

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marin Parać

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Marin Parać

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se Zahvaljujem se svim profesorima i asistentima koji su svojim znanjem, iskustvom i savjetom doprinijeli izradi ovoga rada.

Posebno se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava i Laboratorija za nerazorna ispitivanja, na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Za kraj, posebna zahvala mojoj obitelji na ukazanoj podršci, odricanju i strpljenju koje su imali za mene tijekom studiranja.

Marin Parać



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marin Parać**

Mat. br.: 0035168162

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Razvoj tehnologije tvrdog lemljenja**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Development of Brazing Technology**

Opis zadatka:

Opisati postupke i tehnologiju tvrdog lemljenja sukladno klasifikaciji norme ISO 4063. Analizirati osnovne fizikalne mehanizme nastanka lemljenog spoja te dati pregled lemova i talila sukladno EN 1045 prema vrsti osnovnog materijala i primjene. Posebno proučiti metodologiju određivanja mehaničkih značajki lemljenog spoja kao i primjenu nerazornih ispitivanja primjenom EN 12799.

U eksperimentalnom dijelu na osnovnom materijalu odgovarajućih dimenzija i pripreme odrediti tehnologiju tvrdog lemljenja pri čemu je potrebno uzeti u obzir više vrsta lemova i talila. Definirati prikladan plan pokusa kako bi se mogao kvantificirati utjecaj parametra lemljenja, vrste lema i talila na mehanička svojstva lemljenog spoja. Nadalje, odrediti metodu nerazornih ispitivanja za kontrolu predmetnog lemljenog spoja prema EN 12799 te ocijeniti prikladnost iste za realne proizvodne uvjete.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

Predviđeni datum obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zdao:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. Tvrdo lemljenje.....	2
2.1. Prednosti tvrdog lemljenja	3
2.2. Podjela postupaka tvrdog lemljenja	5
2.3. Ograničenja tvrdog lemljenja.....	6
2.4. Usporedba tvrdog lemljenja sa postupcima zavarivanja.....	6
2.5. Zavarivačko lemljenje.....	7
3. Meko lemljenje	10
3.1. Podjela postupaka mekog lemljenja.....	12
3.2. Primjena mekog lemljenja u industriji elektrotehnike	13
4. Metode zagrijavanja tj. dovoda topline.....	14
4.1. Lemljenje plamenom.....	14
4.2. Lemljenje u peći.....	16
4.3. Indukcijsko lemljenje	19
4.4. Otporno lemljenje	21
4.5. Infracrveno lemljenje	22
4.6. Lemljenje uranjanjem	22
4.7. Egzotermno lemljene	24
4.8. Lemljenje laserom i elektronskim snopom	25
5. Kapilarnost i kvašenje lema.....	26
6. Osnovni materijal.....	30
7. Dodatni materijal	32
7.1. Smještanje i oblik dodatnog materijala	33
8. Talila.....	37
8.1. Podjela talila.....	39
8.1.1. Talila za tvrdo lemljenje teških metala (oznaka FH)	39
8.1.2. Talila za lemljenje lakih metala (oznaka FL).....	40
8.2. Sastav talila	42
8.3. Odabir talila.....	44
8.4. Oblik i metode apliciranja talila.....	44
8.5. Uklanjanje talila	45
9. Priprema površine osnovnog materijala	46

10. Zračnost između spojeva	48
11. Konstrukcija spoja	50
12. Proračun nosivosti spojeva	54
13. Nerazorne metode ispitivanja zalemljenog spoja	57
13.1. Vizualna metoda	58
13.2. Ultrazvučna metoda	59
13.3. Radiografska metoda.....	61
13.4. Penetrantska metoda	62
13.5. Metoda ispitivanja propusnosti	63
13.6. Metoda ispitivanja opterećenjem	65
13.7. Termografska metoda	66
14. Eksperimentalni dio	67
14.1. Priprema uzoraka i označavanje	67
14.2. Postupak lemljenja	68
14.3. Obrada uzoraka nakon lemljenja i vizualna kontrola.....	72
14.4. Ispitivanje radiografskom metodom	74
14.5. Mjerenje prekidne sile.....	75
15. Zaključak	80
LITERATURA.....	82

POPIS SLIKA

Slika 1:	Primjer zavarivačkog lemljenja okvira motocikla [4]	8
Slika 2:	Olovna cijev vodovodnog sustava iz doba Rimskog carstva [5].....	10
Slika 3:	Lemljenje okvira bicikla plamenikom [7]	15
Slika 4:	Dio automata za lemljenje plinskim plamenikom [8]	16
Slika 5:	Ulazak dijelova u prolaznu peć [9].....	18
Slika 6:	Vakuumska peć [10].....	18
Slika 7:	Sklop unutar induktora nakon lemljenja [11].....	19
Slika 8:	Otporno lemljenje bakrenih cijevi [12]	21
Slika 9:	Uranjanje aluminijskih dijelova u rastaljeno talilo [13].....	24
Slika 10:	Princip kapilarnog privlačenja tekućina u staklenoj cjevčici [14]	26
Slika 11:	Prikaz sila površinske napetosti između osnovnog materijala, lema i atmosfere [1].....	27
Slika 12:	Prikaz lema koji kvasi (a) i lema koji ne kvasi površinu (b) [1]	28
Slika 13:	Oblici u kojima dolazi dodatni materijal (krute žice, koluti žice, prsteni, trake, pasta) [15,14].....	35
Slika 14:	Najčešće korišteni dodatni materijali za lemljenje[6]	36
Slika 15:	Prikaz talila koja se najčešće primjenjuju u postupima lemljenja [6]	41
Slika 16:	Prikaz kapilarnog djelovanja u ovisnosti o veličini zračnosti [6]	48
Slika 17:	Kapilarni pritisak punjenja u ovisnosti o širini zračnosti [6]	49
Slika 18:	Prikaz najčešće korištenih spojeva prilikom lemljenja [1].....	51
Slika 19:	Spojevi korišteni prilikom lemljenja [18]	52
Slika 20:	Samonosivi i samo pozicionirajući spojevi korišteni prilikom lemljenja [18].....	53
Slika 21:	Parametri za proračun preklopnog spoja [20]	55
Slika 22:	Prikaz različitih vrsta opterećenja na spoju [19]	56
Slika 23:	Oprema koje se koristi prilikom ultrazvučne metode ispitivanja [20]	60
Slika 24:	Radiogram preklopljenog zalemljenog spoja [22]	62
Slika 25:	Indikacija pukotine prikazana fluorescentnim penetrantom [20].....	63
Slika 26:	Indikacija pukotina prikazana obojenim penetrantom [20].....	63
Slika 27:	Ispitivanje istjecanja helijem [23]	64
Slika 28:	Uzorci pripremljeni za lemljenje	68
Slika 29:	Priprema spoja za postupak lemljenje	69
Slika 30:	Postupak lemljenja uzoraka	71
Slika 31:	Izgled površine uzoraka nakon lemljenja	72
Slika 32:	Izgled površine uzoraka nakon čišćenja	72
Slika 33:	Pukotina duž spoja (uzorak 13)	73
Slika 34:	Vizualno loš spoj (uzorak 22)	73
Slika 35:	Vizualno dobar spoj (uzorak 11)	73
Slika 36:	Rendgenska cijev.....	74
Slika 37:	Radiogram pukotine uzduž spoja (uzorak 13).....	75
Slika 38:	Indikacije na radiogramu (uzorak 11)	75
Slika 39:	Radiogram bez vidljivih indikacija (uzorak 31).....	75
Slika 40:	Kidalice EU 40mod	76
Slika 41:	Uzorak u čeljustima kidalice (uzorak 42).....	76
Slika 42:	Uzorci iz skupine 3 nakon ispitivanja	77
Slika 43:	Pore unutar spoja (uzorak 11)	77

Slika 44:	Nedovoljno kvašenje i penetracija dodatnog materijala (uzorak 13)	78
Slika 45:	Prikaz puknutog kvalitetno zalemljenog spoja (uzorka 43)	78
Slika 46:	Dijagram sila na ispitnim uzorcima.....	79

POPIS TABLICA

Tablica 1: Osnovni pregled procesa lemljenja i zavarivanja [1]	1
Tablica 2: Metali i legure u ovisnosti o jednostavnosti lemljenja [1]	31
Tablica 3: Relativna lemljivost metala i legura u ovisnosti o talilu [1]	38
Tablica 4: Čvrstoće nekih dodatnih materijala za tvrdo lemljenje [19]	54
Tablica 5: Podjela uzoraka prema parametru zračnosti	68
Tablica 6: Tehnički podaci dodatnog materijala [24]	70
Tablica 7: Tehnički podaci talila [25]	71
Tablica 8: Najveće sile pri kojima je došlo do razaranja spoja	76

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	površina
A_L	mm^2	Površina zalemljenog spoja
b	mm	Širina preklopa
D, d	MM	Promjer
F	N	Sila
K_A	-	Faktor udara
l, l_p	mm	Dužina preklopa
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća slabijeg osnovnog materijala u spoju
s	mm	Debljina materijala
S	-	Faktor sigurnosti
T	Nm	Okretni moment
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
γ	N/mm^2	Sila površinske napetosti
θ	$^{\circ}$	Kontaktni kut
σ_B	N/mm^2	Normalno naprezanje
σ_{dop}	N/mm^2	Dozvoljeno normalno naprezanje
σ_{dopM}	N/mm^2	Dozvoljeno naprezanje slabijeg osnovnog materijala u spoju
σ_{LB}	N/mm^2	Vlačna čvrstoća dodatnog materijala
τ_L	N/mm^2	Srednje tangencijalno naprezanje, smično naprezanje
τ_{LB}	N/mm^2	Čvrstoća dodatnog materijala na smik
τ_{Ldop}	N/mm^2	Dozvoljeno tangencijalno naprezanje dodatnog materijala
A	mm^2	površina
A_L	mm^2	Površina zalemljenog spoja
b	mm	Širina preklopa

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je utvrditi utjecaj parametara lemljenja na mehanička svojstva lemljenog spoja.

U teorijskom dijelu rada definirani su postupci mekog i tvrdog lemljenja. Opisan je i definiran fizikalni proces lemljenja te su definirani parametri postupka. Prikazan je pregled i sastav talila koji se primjenjuju za tvrdo lemljenje te je dan pregled nerazornih metoda ispitivanja zalemljenih spojeva.

U prvom dijelu eksperimentalnog istraživanja provedeno je lemljenje uzoraka tehnologijom ručnog lemljenja plamenom uz promjenu zračnosti između uzoraka. U drugom dijelu istraživanja provedena je vizualna i radiografska kontrola kvalitete zalemljenih spojeva s ciljem utvrđivanja kvalitete zalemljenog spoja. U trećem dijelu istraživanja provedeno je mjerenje najveće vlačne sile tj. prekidne sile na spojevima. Na osnovu rezultata dobivenih ispitivanjima zaključilo se o utjecaju zračnosti spojeva na mehanička svojstva istih.

Ključne riječi: meko lemljenje, tvrdo lemljenje, parametri lemljenja, nerazorna ispitivanja

SUMMARY

The aim of this graduate thesis was to determine the influence of the soldering parameters on the mechanical properties of the soldered joint.

In the theoretical part of the thesis, soldering and brazing procedures are defined. The physical process of soldering and parameters of the process are defined. The review and composition of the flux used for hard soldering are presented and a review of nondestructive examination methods of testing of brazed joints is given.

In the first part of the experimental thesis, soldering of samples was done by flame brazing technology with the change of the air gap between the samples. In the second part of the thesis, visual and radiographic control of the quality of fused joints was performed to determine the quality of them. In the third part of the study, the measurement of the greatest tensile force, i.e. the breaking force of the joints, was performed. Based on the results of the tests, it was concluded that the influence of the airborne compounds on the mechanical properties of the compounds was determined.

Key words: soldering, brazing, brazing parameters, nondestructive examination

1. UVOD

Za razliku od zavarivanja, koje je toplinski postupak kao i lemljenje, lemljenje je postupak spajanja pretežno metalnih dijelova s pomoću rastaljenog dodatnog materijala tj. lema, čija je temperatura taljenja ispod temperature taljenja osnovnog materijala. U osnovi prema temperaturi taljenja razlikujemo dvije vrste lemljenja: meko lemljenje (eng: *soldering*) i tvrdo lemljenje (eng. *brazing*). Tvrdo lemljenje koristi više temperature u odnosu na meko, ali su osnovni koncepti slični, posebno po pitanju metalurgije i površinske kemije. Lemljenje se koristi u mnogim industrijama, od egzotičnih primjena u elektronici i svemirskoj tehnici do svakodnevnih vodoinstalaterskih primjena.

Tablica 1: Osnovni pregled procesa lemljenja i zavarivanja [1]

Parametar	Proces		
	Meko lemljenje	Tvrdo lemljenje	Zavarivanje
Vrsta spoja	Mehanički	Metalurški	Metalurški
Temperatura taljenja dodatnog materijala	<450°C	>450°C, niža od temperature taljenja osnovnog materijala	>450°C, niža ili jednaka temperaturi taljenja osnovnog materijala
Korištenje talila kako bi se zaštitila površina osnovnog materijala i kako bi se potpomoglo kvašenje iste	Potrebno	Opcionalno	Opcionalno
Uobičajen izvor topline	Lemilo, ultrazvuk, električni otpor, pećnica	Peć, kemijska reakcija, indukcija, plamenik, infracrveno zračenje	Plazma, električni luk, električni otpor, laser
Vjerojatnost stvaranja deformacija	Niska	Niska	Veoma vjerojatna
Zaostala naprezanja	Nema	Niska vjerojatnost u zoni spoja	Visoka vjerojatnost oko zone zavarenog spoja

2. Tvrdo lemljenje

Tvrdo lemljenje je proces spajanja metala koji su smješteni neposredno jedan uz drugog uz pomoć rastaljenog metala koji se tali iznad 450 °C. Tvrdo lemljenje razlikuje se od mekog lemljenja po tome što dodatni materijal kod mekog lemljenja ima temperaturu tališta ispod 450°C.

Ispravan zalemljeni spoj općenito je rezultat odabira prikladnog dodatnog materijala, čistih metalnih površina koje se spajaju i zagrijavanja na temperaturu taljenja dodatnog materijala kao i izbora prikladnog spoja. Kao i ostali procesi spajanja tvrdo lemljenje objedinjuje različite znanstvene discipline (npr. mehaniku, fiziku i kemiju). [1]

Proces tvrdog lemljenja ima četiri značajna koraka [1]:

- sklop ili područje dijelova koji se spajaju zagrijava se na temperaturu od minimalno 450°C
- sklopljeni dijelovi i dodatni materijal moraju postići temperaturu dovoljno visoku da se rastali dodatni materijal (folija, žica, pasta, prevlaka itd.) ali ne i dijelovi
- rastaljeni dodatni metal, koji se drži u spoju uz pomoć površinske napetosti, širi se u spoj i kvasi površine osnovnog metala
- dijelovi se hlade kako bi se skrutnuo dodatni materijal koji se drži u spoju kapilarnim privlačenjem te sidri dijelove zajedno metalurškom reakcijom i vezivanjem atoma.

Nekoliko elemenata procesa tvrdog lemljenja potrebno je razumjeti kako bi se proizveo zadovoljavajući spoj [1]:

- tečenje dodatnog materijala
- karakteristike osnovnog materijala
- karakteristike dodatnog materijala
- priprema spoja
- dizajn spoja i tolerancija
- temperatura i vrijeme
- brzina i izvor topline.

Isti elementi procesa javljaju se i kod procesa mekog lemljenja. Tvrdo lemljenje prihvaćeno je od strane inženjerske zajednice te je dostiglo dosta uspješnu razinu unutar grupe postupaka spajanja. To se dogodilo uslijed [1]:

- razvoja novih vrsta dodatnih materijala za tvrdo lemljenje
- dostupnosti novih oblika dodatnih materijala
- uvođenja automatizacije koja je izdignula proces tvrdog lemljenja u procesima visoke produktivnosti
- povećanog korištenja tvrdog lemljenja u vakumskim pećima uz aktivne i inertne atmosfere.

Obrtnici koji su se bavili obradom metala, u želji da proizvedu strukture koje je bilo teško ili nemoguće napraviti koristeći tada korištene metode, shvatili su da je moguće popuniti spoj između dva metalna komada sa rastaljenim metalom koji bi se nakon hlađenja skrutnuo. Ubrzo su iz iskustva naučili da metali koji se spajaju i dodatni materijal moraju biti slobodni od oksida i da dodatni materijal mora imati nižu točku tališta i usprkos tome da se dodatni materijal nije nužno spajao sa svim metalima. [1]

Kako se tehnika tvrdog lemljenja razvijala tako su se razvijali i dodatni materijali sa nižom točkom tališta. Prvo su se koristili olovni i lemovi na bazi kositra, kao i rude srebra i kombinacije bakra i arsena koje su bile dostupne te su imale nisku točku tališta. Kasnije se razvila legura bronce koja je bila poželjnija za spajanje bakra, srebra i čeličnih struktura zato što je osiguravala spojeve više čvrstoće te je mogla izdržati više temperature. [1]

Obrtnici koji su se bavili izradom nakita, najvjerojatnije sa željom proizvodnje spojeva bijele boje u svrhu estetike, tope zajedno mjed i srebro, te otkrivaju da navedena kombinacija ima još nižu točku tališta u odnosu na mjed, dobru prionjivost i dobru korozijsku otpornost. Iako su se nakon toga razvile različite kombinacije srebra, bakra i cinka kako bi se zadovoljio uvjet niske točke tališta, ove legure srebra i mjedi, same mjedi i legure olova i kositra u osnovi su bile jedini dodatni materijal za tvrdo lemljenje dostupan generacijama. [1]

2.1. Prednosti tvrdog lemljenja

Tvrdo lemljenje ima mnogo istaknutih prednosti uključujući [1]:

- ekonomičnu izradu kompleksnih i višekomponentnih sklopova
- jednostavnu metodu dobivanja većih površina spoja ili duljine spoja
- toplinski kapacitet spoja približava se onom osnovnog metala

- izvrsnu raspodjelu naprezanja i svojstva toplinske provodljivosti
- mogućnost očuvanja zaštitne metalne prevlake
- mogućnost spajanja lijevanih materijala sa kovanim metalima
- mogućnost spajanja nemetala sa metalima
- mogućnost spajanja metala čija debljina dosta varira u dimenzijama
- mogućnost spajanja različitih metala
- mogućnost spajanja poroznih metalnih komponenti
- mogućnost spajanja velikih sklopova u uvjetima bez naprezanja
- mogućnost očuvanja posebnih metalurških karakteristika metala
- mogućnost spajanja vlaknima i disperzijski ojačanih kompozita
- sposobnost preciznih tolerancija tijekom proizvodnje
- ponovljive i pouzdane tehnike kontrole kvalitete.

Čvrsti, uniformni i nepropusni spojevi mogu se napraviti brzo, jeftino i simultano. Spojevi koji su nedostupni i dijelovi koji se ne mogu spojiti nijednom drugom metodom često se mogu spojiti tvrdim lemljenjem. Komplicirani sklopovi koji se sastoje od debelih i tankih sekcija, neobičnih oblika i različitih kovanih ili lijevanih legura mogu biti pretvoreni u jedinstvene komponente jednim prolaskom kroz peć za tvrdo lemljenje ili kadu za uranjanje. [1, 2]

Tvrdo lemljeni spojevi posjeduju visoku čvrstoću. Priroda metalne veze je takva da čak i jednostavni spoj, ispravno dizajniran i napravljen, posjeduje čvrstoću jednaku ili višu od one osnovnog materijala. Prirodni oblik zaobljene površine ruba zalemljenog spoja od strane dodatnog materijala idealno je oblikovan kako bi bio otporan na zamor budući da se pregiba preko kutova i sekcija koje se spajaju. [1, 2]

Kompleksni oblici mogu biti spojeni sa vrlo malo distorzije i precizno spajanje je relativno jednostavno. Za razliku od zavarivanja, kod kojeg primjena intenzivne topline na male površine može rezultirati gubitkom poravnanja i unošenjem zaostalih naprezanja u dijelove, tvrdo lemljenje uključuje relativno ujednačeno zagrijavanje stoga je poravnavanje dijelova jednostavnije. [1, 2]

2.2. Podjela postupaka tvrdog lemljenja

Postupci tvrdog lemljenja mogu se podijeliti prema normi HRN EN ISO 4063:2012. Internacionalna norma uspostavlja nomenklaturu sa referentnim brojevima za zavarivanje i slične procese. Svaki proces definiran je sa referentnim brojem. Ovaj standard pokriva glavne grupe procesa (jednom znamenkom), grupe (dvjema znamenkama) i podgrupe (tri znamenke). Referentni broj bilo kojeg procesa ima najviše tri znamenke te je sustav zamišljen kao pomoć prilikom izrade nacрта, radnih lista, specifikacija postupaka zavarivanja i tako dalje. [3]

Proces lemljenja označava se sljedećom oznakom [3]:

- 9 tvrdo lemljenje, meko lemljenje i zavarivačko lemljenje

Daljnje grupe i podgrupe tvrdog lemljenja označavaju se [3]:

- 91 tvrdo lemljenje
- 911 infracrveno tvrdo lemljenje
- 912 tvrdo lemljenje plamenom
- 913 tvrdo lemljenje u peći
- 914 tvrdo lemljenje uranjanjem
- 915 tvrdo lemljenje u slanim kupkama
- 916 indukcijsko tvrdo lemljenje
- 918 otporno tvrdo lemljenje
- 919 difuzijsko tvrdo lemljenje
- 924 tvrdo lemljenje u vakuumu
- 93 ostali procesi tvrdog lemljenja

Kao posebnu skupinu može se istaknuti zavarivačko lemljenje koje se označava na sljedeći način [3]:

- 97 zavarivačko lemljenje
- 971 zavarivačko lemljenje plinskim plamenom
- 972 zavarivačko lemljenje električnim lukom

Pored navedenih procesa postoje još dva procesa tvrdog lemljenja koji su zastarjeli [3]:

- 917 tvrdo lemljenje ultrazvukom
- 923 tvrdo lemljenje trenjem

2.3. Ograničenja tvrdog lemljenja.

Tvrdo lemljeni spoj nije homogeno već je heterogeno tijelo sastavljeno od više faza sa različitim fizikalnim i kemijskim svojstvima. U najjednostavnijem slučaju sastoji se od dijelova osnovnog materijala koji se spajaju i dodatnog materijala. Djelomično otapanje osnovnog materijala u kombinaciji sa procesima difuzije može promijeniti sastav, kemijska i fizikalna svojstva rubne zone formirane na mjestu između osnovnog i dodatnog materijala često duž cijelog spoja. [1, 2]

Prilikom određivanja čvrstoće ovih heterogenih spojeva, pojednostavljeni koncept elastične i plastične teorije koji vrijedi za homogena metalna tijela koja su izložena naprezanjima koja su uniformno prenesena sa jedne površine ili prostora elementa na sljedeći, ne vrijede. Kod tvrdo lemljenog spoja formiranog od nekoliko materijala sa različitim karakteristikama otpornosti na deformaciju i brzinama deformacije, naprezanja prouzrokovana vanjskim opterećenjima nisu uniformno raspoređena. [1, 2]

2.4. Usporedba tvrdog lemljenja sa postupcima zavarivanja

Sama činjenica da tvrdo lemljenje ne uključuje nikakvo značajno topljenje osnovnog materijala pruža značajnu prednost u odnosu na ostale zavarivačke postupke. Općenito, moguće je održavati uže tolerancije prilikom sklapanja i proizvesti kozmetički uredniji spoj bez skupih operacija naknadne obrade. Još je važnija činjenica da se tvrdim lemljenjem mogu spajati različiti metali (ili metali i keramike) koji se zbog metalurške nekompatibilnosti ne mogu spojiti tradicionalnim postupcima zavarivanja. Ukoliko osnovni materijali ne moraju biti rastaljeni da bi se spojili, nije bitno što imaju različite temperature tališta. Iz toga proizlazi da se čelik može tvrdo zalemiti na bakar jednako kao i na neki drugi čelik. [1]

Postupak tvrdog lemljenja općenito proizvodi manje toplinskih deformacija ili iskrivljenja u odnosu na postupke zavarivanja. Cijeli dio može se zagrijati na istu temperaturu lemljenja te se na taj način sprječava bilo kakva naprezanja uzrokovana lokalnim zagrijavanjem kao kod zavarivanja. [1, 2]

Tvrdo lemljenje pogodno je za masovnu proizvodnju i relativno ga je jednostavno automatizirati, zato što unos topline ne mora biti lokaliziran kao kod zavarivanja. Činjenica je da se uz dobro pozicioniranje i toplinu, tvrdo lemljeni spoj radi „sam od sebe“ i nije ovisan o vještini operatera kao većina postupaka zavarivačkih procesa. [1]

Automatizacija je također pojednostavljena uz činjenicu da se unos topline u spoj može ostvariti na različite načine poput plinskog plamenika, peći, induktivno, električnim otporom, uranjanjem itd. Nekoliko spojeva u jednom sklopu često se mogu ostvariti unutar jednog ciklusa zagrijavanja što dodatno poboljšava proizvodnost automatizacije. [1, 2]

Kao što je prikazano u tablici 1 ne dolazi do taljenja osnovnog materijala prilikom tvrdog lemljenja; ipak temperature ostvarene u samom postupku mogu utjecati na svojstva metala koji se spajaju. Na primjer: osnovni materijal čija su svojstva dobivena hladnim kovanjem može omekšati ili može doći do porasta zrna ukoliko je temperatura tvrdog lemljenja iznad njegove rekristalizacijske temperature. Mehanička svojstva postignuta toplinskom obradom mogu biti izmijenjena unosom topline tijekom tvrdog lemljenja. S druge strane, materijalima u popuštenom stanju obično nisu izmijenjena svojstva procesom tvrdog lemljenja. [1, 2]

Kao i kod zavarivačkih postupaka tvrdo lemljenje proizvest će zonu utjecaja topline sa izmijenjenom mikro strukturom uslijed intenzivnog uzajamnog prijenosa topline između osnovnog i dodatnog materijala. Širina ove zone varira sa procesom korištenim za zagrijavanje. Kod zagrijavanja plamenikom ili indukcijom zagrijava se samo lokalizirana zona dok se kod zagrijavanja u peći ili uranjanjem zagrijava cijeli dio koji se tvrdo lemi. Zona utjecaja topline nastala tvrdim lemljenjem šira je i nije toliko jasno definirana kao ona nastala postupcima zavarivanja. [1, 2]

2.5. Zavarivačko lemljenje

Zavarivačko lemljenje poseban je proces spajanja tvrdim lemljenjem kod kojeg se rastaljeni dodatni materijal smješta u specifičnu konfiguraciju spoja te se metalurška veza ostvaruje kvašenjem i često je praćena sa određenim udjelom difuzije sa osnovnim materijalom. Zavarivačko lemljenje zahtijeva zagrijavanje i taljenje dodatnih materijala iznad 450°C. [1]

Stroge tolerancije nisu kritične budući da dodatni materijal teče u raspone šire od onih koji se koriste za tvrdo lemljenje. Konstruktori koriste zavarivačko lemljenje kao nisko temperaturnu zamjenu za zavarivanje plamenom ili kao jeftinu zamjenu za tvrdo lemljenje. Priprema spojeva za zavarivačko lemljenje isto je kao i kod pripreme spojeva za zavarivanje plamenom. Zavarivačko lemljenje koristi se za spajanje lijevanog željeza, čelika, bakra, nikla i legura na bazi nikla. Slika 1 prikazuje primjer zavarivačkog lemljenja okvira motocikla. [1]



Slika 1: Primjer zavarivačkog lemljenja okvira motocikla [4]

U usporedbi sa konvencionalnim postupcima zavarivanja zavarivačko lemljenje zahtijeva niži unos topline, omogućuje više brzine rada i prouzrokuje manje deformacija. Deponirani dodatni materijal mekan je i duktilan što omogućava njegovu dobru strojnu obradu i zaostala naprezanja su niska. Postupak je sposoban spojiti krhko lijevano željezo bez opsežnog postupka predgrijavanja. [1]

Iako je zavarivačko lemljenje u počecima koristilo isti plamenik koji se koristi prilikom zavarivanja plamenom, bakar kao dodatni materijal i odgovarajuće talilo, sadašnje tehnike, pored opreme za plinsko zavarivanje, koriste i opremu za zavarivanje električnim lukom sa grafitnom elektrodom, TIG zavarivanje, MIG/MAG zavarivanje ili zavarivanje plazmom bez talila za ručni, poluautomatski ili automatski način rada kako bi ekonomično spojili i deponirali dodatni materijal u spoj. Zavarivačko lemljenje plamenom još uvijek se naširoko koristi za reparaturne popravke strojeva. Izbor dodatnog materijala, dobro kvašenje i kompatibilnost sa osnovnim materijalom kao i zaštita od zraka tj. atmosfere važni su za efektivno korištenje procesa sa bilo kojom prikladnom metodom grijanja. [1]

Širok raspon dijelova može se spojiti zavarivačkim lemljenjem korištenjem uobičajenih priprema spojeva koji se koriste prilikom zavarivanja. Sučeljeni, kutni ili rubni spojevi mogu se koristiti za spajanje jednostavnih i kompleksnih spojeva napravljenih iz lima, ploča, cijevi, šipki, profila, odljevaka i otkivaka. Oštri kutovi koji se mogu jednostavno pregrijati i mogu postati točke koncentracije naprezanja, trebali bi se izbjegavati. Kako bi se postigla dobra čvrstoća potrebno je adekvatno povezivanje između dodatnog i osnovnog materijala. Pravilan odabir spoja rezultirat će čvrstoćom dodatnog materijala koja je jednaka ili premašuje minimalnu vlačnu čvrstoću osnovnog materijala. Zbog zaštite inertnih plinova, elektrolučne metode imaju manje uključaka talila i oksida na površinama. Rezultat toga je viša čvrstoća spoja i poboljšana korozijska otpornost. [1]

3. Meko lemljenje

Meko lemljenje definira se kao proces spajanja prilikom kojeg se osnovni materijal spaja zajedno korištenjem dodatnog materijala čija temperatura tališta ne prelazi 450°C . Osnovni materijal se ne tali tijekom procesa spajanja. Dodatni materijal obično se rasporedi između pravilno raspoređenih površina spoja uz pomoć kapilarnosti.

Kao i tvrdo lemljenje i ostali procesi spajanja, meko lemljenje uključuje nekoliko polja iz znanosti uključujući mehaniku, kemiju i metalurgiju. Lemljenje je jednostavna operacija koja se sastoji od relativnog pozicioniranja dijelova koji se spajaju, kvašenja površina sa rastaljenim dodatnim materijalom i omogućavanja dodatnom materijalu da se ohladi dok se ne skrutne. [1]

Veza između dodatnog i osnovnog materijala je više od adhezijske ili mehaničke iako one doprinose čvrstoći spoja. Ključno svojstvo spoja je metalurška veza između dodatnog i osnovnog materijala. Dodatni materijal reagira sa osnovnim materijalom te ga kvasi formiranjem intermetalnih spojeva. Nakon skrućivanja spoj se drži na okupu istom privlačnom silom koja drži komad metala na okupu. [1]

Meko lemljenje stara je metoda spajanja. Spominje se u Bibliji i postoje dokazi njene primjene u Mezopotamiji prije 5000 godina daleko prije vremena Kleopatre kao i kasnije u Egiptu, Grčkoj i Rimu. Plinije Stariji u svojoj *Historia Naturalis* napisanoj prije 2000 godina spominje zalemljene spojeve na cijevima rimskih akvadukata koji su izrađeni od takozvane tercijarne mješavine, legure olova i kositra u omjeru 2:1. Slika 2 prikazuje cijev iz doba Rimskog carstva. Na njoj je jasno vidljivo kako je cijev zalemljena sa gornje strane. [1]



Slika 2: Olovna cijev vodovodnog sustava iz doba Rimskog carstva [5]

Raniji dodatni materijali bili su legure pronađene u prirodi što je značilo da je bilo dostupno svega nekoliko dodatnih materijala sa veoma ograničenim rasponom svojstava. Zato što su se ti raniji dodatni materijali općenito primjenjivali za spajanje dijelova nakita ili za spajanje ručki na dekorativne posude, primarno zahtjevi su bili estetski izgled i niska točka tališta dok je čvrstoća spoja bila sekundarna. Materijali su bili rijetki i skupi te su posao odrađivali vješti umjetnici. Iz tog razloga takve predmete mogli su si priuštiti samo bogati. [1]

Tek unazad posljednja dva stoljeća neki su metali postali jeftini te se počinju lemiti korisniji dijelovi. Pojava električne tehnologije zahtijevala je spajanje električnih vodova što je postala najčešće korištena primjena mekog lemljenja. To je značilo da je potrebno uzeti u obzir električna svojstva dodatnih materijala te je električni kontinuitet spoja postao primarna važnost u odnosu na čvrstoću i vizualni izgled kao što je to bio slučaj sa nakitom i sitnim priborom. Primjena lemljenja za električne spojeve također uključuje jednostavne mehaničke spojeve i ponavljajuće operacije. [1]

Trošak materijala općenito je puno niži zato što se primjenjuju lemovi na bazi olova i kositra. Čak i danas uobičajeno je dati prvo udio kositra kada se obilježava dodatni materijal (npr. dodatni materijal 40/60 odnosi se na dodatni materijal sa 40% kositra i 60% olova). Do 20. stoljeća metalurška znanost razvila se do točke da se novi dodatni materijali mogu prilagoditi specifično za električnu, vodoinstalatersku ili strukturalnu primjenu. [1]

Meko lemljenje ima nekoliko jasnih prednosti nad ostalim tehnikama spajanja kao što su zavarivanje ili spajanje sa vodljivim ljepilima [1]:

- Spoj se formira samostalno prirodom toka, kvašenjem i kristalizacijskim procesom čak i kad toplina i dodatni materijal nisu precizno usmjereni na mjesta koja se spajaju.
- Zato što dodatni materijal ne pirjanja na izolirajuće materijale može ga se primijeniti u velikim količinama u odnosu na vodljiva ljepila. Temperature mekog lemljenja su relativno niske tako da nema potrebe za lokalnim unosom topline kao kod zavarivanja.
- Meko lemljenje omogućava značajnu slobodu prilikom dimenzioniranja spojeva tako da se mogu ostvariti dobri rezultati čak i kada se koriste različite komponente na istom proizvodu.

- Meko zalemljeni spojevi mogu se rastaviti ukoliko je to potrebno za potrebe popravaka.
- Oprema za ručno i mehanizirano meko lemljenje je relativno jednostavna.
- Proces mekog lemljenja može se jednostavno automatizirati što omogućava integraciju opreme za zavarivanje unutar proizvodne linije sa ostalom opremom.

3.1. Podjela postupaka mekog lemljenja

Kao i kod lemljenja postupci mekog lemljenja mogu se podijeliti prema normi HRN EN ISO 4063:2012. Sustav označavanja je isti te se proces lemljenja označava se sljedećom oznakom[3]:

- 9 tvrdo lemljenje, meko lemljenje i zavarivačko lemljenje

Daljnje grupe i podgrupe mekog lemljenja označavaju se [3]:

- 94 meko lemljenje
- 941 infracrveno meko lemljenje
- 942 plameno meko lemljenje
- 943 meko lemljenje u peći
- 944 meko lemljenje uranjanjem
- 945 meko lemljenje u slanoj kupci
- 946 indukcijsko meko lemljenje
- 947 ultrazvučno meko lemljenje
- 948 otporno meko lemljenje
- 949 difuzijsko meko lemljenje
- 951 meko lemljenje stojnim valom
- 952 meko lemljenje lemilicom ili lemilom
- 954 meko lemljenje u vakuumu
- 956 meko lemljenje provlačenjem
- 96 ostali procesi mekog lemljenja

Pored navedenih procesa postoje još jedan proces mekog lemljenja koji je zastario [3]:

- 953 meko lemljenje abrazijom

3.2. Primjena mekog lemljenja u industriji elektrotehnike

Meko lemljenje u području elektrotehnike uvelike se razlikuje u odnosu na meko lemljenje u ostalim industrijama. Iako su fizikalna svojstva svih procesa mekog i tvrdog lemljenja ista, svojstva specifična za primjenu u elektronici su mnogobrojna te bi se moglo govoriti o lemljenju u elektronici kao o posebnoj tehnologiji. [1]

Industrija elektrotehnike zahtijeva od dodatnih materijala da imaju sljedeća svojstva [1]:

- kompatibilnost sa bakrom (pogotovo u odnosu na ponašanje prilikom legiranja i temperature taljenja)
- dobru električnu vodljivost
- jednostavnost rada kako bi se omogućilo radnicima da brzo ostvaruju jeftine i pouzdane spojeve.

Meko lemljenje na polju elektronike prošlo je kroz velike promjene od doba kada su bili izrađeni prvi radio prijemnici. Između 1920. i 1940.-tih svi spojevi radili su se korištenjem metode povezivanjem žicom od točke do točke i lemljeni spojevi radili su se korištenjem ručnih lemilica. Nakon II. svjetskog rata raste potreba za potrošačkom elektronikom i do 1950. razvija se masovno tržište. Kako bi se zadovoljili zahtjevi tržišta korištena je prva tehnika za masovno lemljenje, tehnika uranjanja, na pločicama koje su bile preteča današnjim tiskanim pločicama. Krajem 1950.-tih u Engleskoj je razvijeno lemljenje tehnikom stojnog vala koja se potom širi na Sjedinjene Američke Države. Razvoj je bio uvjetovan uvođenjem tiskanih pločica. Metoda je bila primaran izbor spajanja kroz 1980.-te a koristi se i dan-danas u masovnoj proizvodnji. [1]

Razvoj i sazrijevanje višeslojnih tiskanih pločica i prvi naponi prema minijaturizaciji dogodili su se u 1970.-tim godinama. Dual inline package zamjenjuje više diskretnih komponenata te do ranih 1980.-tih pritisak za povećanjem gustoće komponenata raste do te mjere da je bila potrebna nova tehnika povezivanja te je razvijena tehnologija površinskog povezivanja (eng. Surface mount technology - SMT). SMT tehnologija zahtijevala je nove načine ostvarivanja zalemljenih spojeva što je dovelo do razvoja tehnike parne faze, infracrvene tehnike, tehnike vrućeg plina i ostalih tehnika mekog lemljenja. [1]

Meko lemljenje ostaje preferirana metoda spajanja u industriji elektronike. To je jedina tehnologija metalurškog spajanja prikladna za masovnu proizvodnju elektronike i električnih spojeva unutar temperaturnog ograničenja elektroničkih komponenata i podloga na kojima se nalazi sklop. [1]

4. Metode zagrijavanja tj. dovodenja topline

Mnogobrojne metode zagrijavanja dostupne za lemljenje često predstavljaju ograničenja dizajnera ili inženjera prilikom izbora najboljeg kapilarnog spoja. Budući da učinkovito kapilarno spajanje zahtijeva učinkovit prijenos topline sa izvora topline na spoj nije moguće primjerice zalemiti žicu promjera 0,0025 milimetara na komad bakra mase 2 do 3 kilograma sa malim plamenikom. [1]

Veličina i cijena individualnih sklopova, potreban broj i brzina proizvodnje utjecat će na odabir metode zagrijavanja. Ostali faktori također se moraju razmotriti uključujući brzinu zagrijavanja, diferencijalni toplinski gradijent kao i vanjske i unutrašnje brzine hlađenja. Ovi faktori uvelike variraju kod različitih metoda zagrijavanja te je potrebno razmotriti i njihov utjecaj na dimenzijsku stabilnost, deformaciju i strukturu spoja. [1]

4.1. Lemljenje plamenom

Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 metoda ručnog lemljenja plamenom nosi sljedeće oznake postupka ovisno o tome radi li se o tvrdom ili mekom lemljenju [3]:

- 912 tvrdo lemljenje plamenom
- 971 zavarivačko lemljenje plinskim plamenom
- 942 plameno meko lemljenje

Lemljenje plamenom najčešće je korištena metoda za popravke, unikatne radove, za proizvode koji imaju kratko tržišno vrijeme i kao alternativa postupcima zavarivanja. Svaki spoj kojemu se može pristupiti plamenom te ga se može zagrijati na temperaturu lemljenja (samo sa plamenom ili uz pomoćno zagrijavanje) može biti zalemljen ovom tehnikom. [1]

Iako se može koristiti bilo koji uređaj koji proizvodi plamen, komercijalne primjene koriste isti plamenik, kontrolu i plinove koji se koriste kod zavarivanja plamenom. Prelazak na lemljenje zahtijeva samo promjenu sapnice plamenika i leća na zaštitnim naočalima. [6]

Tehnika lemljenja plamenom relativno je jednostavna i može se usvojiti u kratkom vremenskom periodu. Osobe koje imaju iskustvo u zavarivanju plinskim plamenom općenito vrlo jednostavno nauče tehniku lemljenja plamenom. Slika 3 prikazuje lemljenje okvira bicikla sa plamenom. [1, 6]



Slika 3: Lemljenje okvira bicikla plamenikom [7]

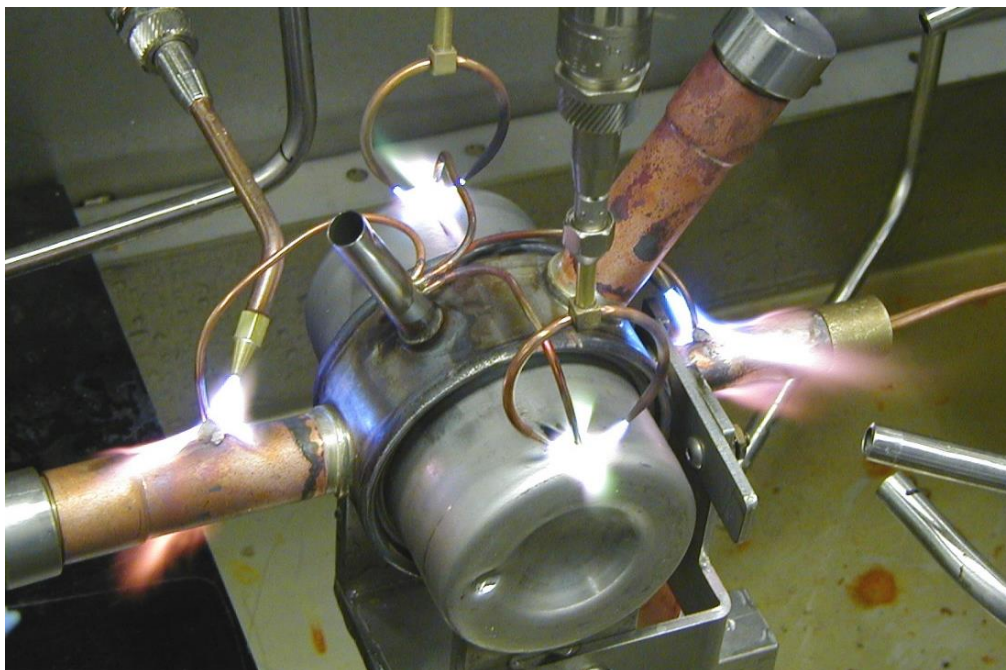
Ovisno o potrebnoj temperaturi i toplini, sve komercijalno dobavljive plinske mješavine mogu biti korištene kao gorivo za plamenik: mješavina kisika i acetilena kisika i vodika, kisika i prirodnog plina, acetilena i zraka, vodika i zraka, propan, metan i prirodni plin u kombinaciji sa zrakom. Mješavina kisika i acetilena i kisika i prirodnog plina najčešće su korištene mješavine i preferiraju se tim redoslijedom. Podešavanje plamena je vrlo važno i općenito je poželjno da plamen bude blago reducirajući kako bi se spriječila površinska oksidacija dijelova. [6]

Kombinacija kisika i acetilena proizvodi najviše temperature. Ostali plinovi daju plamen niže temperature koji je slabijeg intenziteta te su stoga oni jednostavniji za primjenu što im je prednost prilikom lemljenja tanjih materijala. [6]

Ručna tehnika lemljenja plamenom pogotovo je korisna prilikom lemljenja sklopova sa sekcijama različitih masa. Ukoliko to zahtijeva količina proizvodnje, može biti postavljena strojna operacija korištenjem jednog ili više plamenika opremljenih sa jednom ili više dizni. Stroj može biti konstruiran da pomiče ili radne komade ili plamenike. [1]

Lemljenje plamenikom može se jednostavno automatizirati sa prikladnom dobavom plina, napravama za fiksiranje i kontrolom ciklusa. Obično takvi sustavi uključuju više stupanjske rotirajuće stolove. Dio se postavlja u napravu za držanje na prvoj stanici te se potom zakreće na jednu ili više stanica za predgrijavanje ovisno o potrebnom vremenu grijanja.

Sljedeća stanica je stanica za tvrdo lemljenje nakon koje slijedi stanica za hlađenje i izbacivanje. Slika 4 prikazuje dio automata za lemljenje plamenom iz koje je vidljivo kako je moguće na stroju istovremeno lemiti nekoliko spojeva budući da se može koristiti više plamenika u odnosu na ručno lemljenje. [1, 6]



Slika 4: Dio automata za lemljenje plinskim plamenikom [8]

4.2. Lemljenje u peći

Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 metoda lemljenja u peći nosi sljedeće oznake postupka ovisno o tome radi li se o tvrdom ili mekom lemljenju te ovisno o kakvoj se vrsti peći radi [3]:

- 913 tvrdo lemljenje u peći
- 924 tvrdo lemljenje u vakuumu
- 943 meko lemljenje u peći
- 954 meko lemljenje u vakuumu

Lemljenje u peći popularno je zbog niskih troškova opreme, prilagodljivosti peći i minimalnih potreba za napravama za fiksiranje dijelova. Postupak je relativno jeftin u odnosu na ostale postupke poput lemljenja plamenikom, indukcijskog lemljenja, lemljenja u slanoj kupci itd., kada je primarni faktor visoka produktivnost. Sekundarni faktori uključuju rad sa alatom, nanošenje talila i čišćenje. Dijelovi bi trebali biti samonosivi ili fiksirani i sklopljeni, sa dodatnim materijalom unaprijed smještenim blizu ili unutar spoja.

Dobro fiksiranje veoma je važno tijekom lemljenja u pećima. Gibanje spoja tijekom skrućivanja lema može rezultirati lošim spojevima. Kod mnogo sklopova koji se leme često je sama masa dijelova dovoljna je da ih drži zajedno. [1]

Koriste se četiri osnovna tipa peći [1]:

- peć sa šaržom sa zrakom ili kontroliranom atmosferom
- prolazna peć sa ili zrakom ili kontroliranom atmosferom
- retorta sa kontroliranom atmosferom
- vakumska peć.

Lemljenje u peći pogotovo je primjenjivo zbog svoje visoke produktivnosti pri čemu se koristi prolazna peć. Za srednju produktivnost najbolje je koristiti peći sa šaržom. Bez obzira na tip peći zagrijavanje se najčešće postiže električnim otporom tj. električnim grijačima iako se mogu koristiti ostale vrste izvora topline. [1]

Odabir talila važan je parametar prilikom lemljenja u pećima. Talila na bazi kolofonija i organska talila podliježu raspadanju ukoliko se drže na povišenim temperaturama kroz dulji vremenski period. Ukoliko se oni koriste dijelovi se moraju brzo dovesti na temperaturu taljenja dodatnog materijala. Ponekad je povoljno uroniti dijelove u otopinu vrućeg talila prije smještanja u peć. Kada se koristi talilo na bazi kolofonija općenito je nužno koristiti dodatni materijal sa 50 ili više posto kositra. [1]

Reducirajuća atmosfera korištena u peći ne dozvoljava stvaranje spojeva bez primjene talila zato što su temperature na kojima atmosfere postaju reducirajuće puno više od temperature taljenja dodatnog materijala. Korištenje inertnih atmosfera sprječava daljnju oksidaciju dijelova ali mora se koristiti talilo kako bi se uklonio postojeći oksidni sloj. [1]

Kada se koriste prolazne peći može se postaviti nekoliko različitih temperaturnih zona kako bi se omogućilo predgrijavanje, lemljenje i hlađenje. Brzina prolaska kroz peć mora biti kontrolirana kako bi se omogućilo prikladno vrijeme držanja na temperaturi lemljenja. Također nužno je dobro osigurati sklopove da ne dođe do pokretanja dijelova dok putuju po traci. Slika 5 prikazuje dijelove koji ulaze u prolaznu peć. Na njoj je također vidljivo kako je dodatni materijal u obliku prstena smješten uz sami spoj. [1]



Slika 5: Ulazak dijelova u prolaznu peć [9]

Lemljenje velikih sklopova izvodi se u vakumskim pećima što sprječava oksidaciju tijekom ciklusa zagrijavanja i eliminira potrebu za talilom. Lemljenje u vakuumu pronašlo je široku primjenu u svemirskoj i nuklearnoj tehnici, gdje se spajaju reaktivni metali ili gdje se ne tolerira zaostalo talilo u spoju. Lemljenje u vakuumu ne dozvoljava širok izbor dodatnih materijala kao lemljenje u atmosferi. Slika 6 prikazuje vakumsku peć koja se pored toplinske obrade može koristiti i za lemljenje. [1]



Slika 6: Vakuumaska peć [10]

U većini slučajeva vakumske peći griju se električnim grijačima. Ukupno vrijeme operacije lemljenja u vakuumu obično je mnogo dulje nego kod ostalih tehnika i uključuje korištenje skupe opreme za dug vremenski period za relativno malu proizvodnost. Ipak većina metala koji se leme u vakuumu također je vrlo skupa i primjena tog procesa omogućuje bolju ekonomičnost materijala tijekom proizvodnje dok osigurava nužna svojstva spoja te je često opravdana. [1]

4.3. Indukcijsko lemljenje

Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 metoda induksijskog lemljenja nosi sljedeće oznake postupka ovisno o tome radi li se o tvrdom ili mekom lemljenju [3]:

- 916 induksijsko tvrdo lemljenje
- 946 induksijsko meko lemljenje

Metoda induksijskog zagrijavanja u svrhu lemljenja je čista i brza te se može dobro kontrolirati temperatura i lokacija zagrijavanja, te zahtijeva vrlo malo vještina od strane operatera. [1]

Radni komad smješta se u ili blizu zavojnice kroz koju protječe izmjenična struja koja inducira struju na željenom području te se ono uslijed te struje zagrijava. Zavojnice, koje su hladene vodom, izrađene su specifično za svaki dio stoga se učinkovitost zagrijavanja oslanja na najbolji dizajn zavojnice, snagu i frekvenciju za svaku pojedinačnu primjenu. U većini slučajeva zavojnica zagrijava samo područje spoja. Slika 7 prikazuje gotov sklop zalemljen metodom induksijskog lemljenja koji se nalazi još uvijek u induktoru. [7]



Slika 7: Sklop unutar induktora nakon lemljenja [11]

Mogućnost selektivnog zagrijavanja omogućuje induktivnoj metodi da se koristi tamo gdje se zahtijeva lokalizirano lemljenje.

Postoji nekoliko izvora visoke frekvencije koji napajaju induksijske zavojnice, svaki sa različitim rasponom frekvencija. Frekvencija izvora određuje vrstu topline koja će se inducirati u radnom komadu: izvori visoke frekvencije površinski će zagrijavati radni komad dok će izvori niže frekvencije zagrijavati radni komad dublje u površinu. Toplina potrebna za lemljenje obično se razvije unutar 10 do 60 sekundi. [1]

Indukcijsko lemljenje prikladno je za masovnu proizvodnju te su česte mehanizirane linije koje pomiču sklopove u i iz zavojnice. Dodatni materijal obično se unaprijed smješta u sami spoj te se lemljenje može izvoditi na zraku uz korištenje talila, u inertnoj atmosferi ili u vakuumu. Velika brzina zagrijavanja velika je prednost kod induksijskog zagrijavanja kada se koriste dodatni materijali koji imaju tendenciju isparavanja ili segregiranja. Ciklus zagrijavanja kod induksijskog lemljenja je automatiziran čak i kada se dijelovi ručno smještaju u zavojnicu. [1]

Jedini zahtjev na materijal koji se induksijski lemi je taj da mora biti električno vodljiv. Brzina zagrijavanja ovisi o induciranom toku struje. Indukcijsko zagrijavanje općenito je primjenjivo za lemljenje uz sljedeće zahtjeve [1]:

- masovna proizvodnja
- unos topline na lokalizirano područje
- minimalna oksidacija površine uz spoj
- dobar estetski izgled i konzistentna visoka kvaliteta spoja
- jednostavan oblik spoja pogodan za mehanizaciju.

Tehnike induksijskog lemljenja zahtijevaju od dijelova koji se spajaju da imaju čiste površine i da razmaci budu točno održavani. Općenito se zahtijevaju visoko kvalitetni dodatni materijali kako bi se osiguralo brzo širenje i dobro kapilarno tečenje. Praoblaci često pružaju najbolji način dodavanja točne količine dodatnog materijala i talila u spoj. [1]

Kada se induksijski leme različiti metali (pogotovo spojevi koji se sastoje od magnetskih i nemagnetskih komponenata) posebna pažnja mora se posvetiti dizajnu induktora kako bi se oba dijela dovela na otprilike istu temperaturu. [1]

4.4. Otporno lemljenje

Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 metoda otpornog lemljenja nosi sljedeće oznake postupka ovisno o tome radi li se o tvrdom ili mekom lemljenju [3]:

- 918 otporno tvrdo lemljenje
- 948 otporno meko lemljenje

Otporno lemljenje najprimjenjivija je metoda za relativno jednostavne spojeve metala koji imaju visoku električnu provodljivost. U ovom procesu dijelovi se lokalno zagrijevaju. Dodatni materijal koji je unaprijed smješten između radnih komada tali se toplinom koja je proizašla iz otpora toku struje kroz elektrode i radne komade. Uobičajeno struja koja se koristi za zagrijavanje (obično je riječ o izmjeničnoj struji) prolazi kroz sam spoj. Spoj postaje dio strujnog kruga i toplina potrebna za lemljenje ostvaruje se uslijed električnog otpora na spoju. Slika 8 prikazuje primjer otpornog lemljenja bakrenih cijevi. [1]



Slika 8: Otporno lemljenje bakrenih cijevi [12]

Oprema je ista kao i ona koja se koristi kod otpornog zavarivanja te se pritisak potreban za ostvarivanje električnog kontakta kroz spoj obično primjenjuje kroz elektrode. Taj pritisak također je i uobičajena metoda za ostvarivanje uskih dosjeda potrebnih za kapilarnost u spoju. Dijelovi se obično drže između bakrenih ili grafitnih elektroda. [1]

Proizvodni sustavi mogu uključivati više elektroda, elektrode u obliku valjaka ili posebne elektrode ovisno o tome koje postavke će osigurati povoljnije brzine lemljenja, lokaliziranje zagrijavanje i potrošnju električne energije. [1]

4.5. Infracrveno lemljenje

Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 metoda otpornog lemljenja nosi sljedeće oznake postupka ovisno o tome radi li se o tvrdom ili mekom lemljenju [3]:

- 911 infracrveno tvrdo lemljenje
- 941 infracrveno meko lemljenje

Razvoj halogenih lampi i dostupnost prikladnih reflektora omogućilo je infracrvenu tehniku zagrijavanja komercijalno važnu za lemljenje. Infracrvena toplina je toplina nastala zračenjem koja se dobiva sa izvorima koji imaju energijsku frekvenciju iznad valne duljine od 780 nm u svjetlosnom spektru. Iako postoji nešto vidljive svjetlosti kod svakog izvora svjetlosti sa karakteristikama crnog tijela, zagrijavanje se principijelno izvodi sa nevidljivom radijacijom. Komercijalno su dobavljeni izvori topline (lampe) koji su u mogućnosti isporučiti i do 5 kW energije. Najčešće se koriste se lampe sa rasponom snage od 45 do 1500 W ovisno o primjeni. Lampe ne moraju pratiti konturu dijelova kako bi zagrijale zonu spoja iako unos topline varira inverzno sa kvadratom udaljenosti od izvora. [1]

Najčešći izvori infracrvenog zračenja su žarulje sa žarnom nitima. Halogena žarulja ima široku primjenu zato što je dosta stabilna i pouzdana kroz široke raspone temperatura. [1]

Sustavi infracrvenog lemljenja u osnovi su jednostavni i jeftini za rad. Jedan od najkritičnijih parametara je stanje površine. Varijacije u stanju površine mogu biti djelomično kompenzirane podešavanjem snage zagrijavanja. Prednosti ovog procesa su ponovljivost, mogućnost koncentriranja ili fokusiranja energije sa reflektorima i lećama, ekonomičnost i nedostatak kontakta sa dijelovima. [1]

Lampe su obično smještene u konfiguraciju koja podsjeća na toster, sa dijelovima koji putuju između dva seta lampi. Infracrveno lemljenje može koncentrirati veliku količinu topline na malu površinu što može biti korisno u nekim primjenama. Metoda infracrvenog lemljenja općenito nije toliko brza kao indukcijsko lemljenje ali je oprema puno jeftinija. [1]

4.6. Lemljenje uranjanjem

Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 metoda lemljenja uranjanjem nosi sljedeće oznake postupka ovisno o tome radi li se o tvrdom ili mekom lemljenju, te u ovisnosti o vrsti rastaljene kupke [3]:

- 914 tvrdo lemljenje uranjanjem
- 915 tvrdo lemljenje u slanim kupkama
- 944 meko lemljenje uranjanjem
- 945 meko lemljenje u slanoj kupci

Lemljenje uranjanjem uključuje uranjanje sklopljenih dijelova u kupku. Kupka može biti rastaljeni dodatni materijal, rastaljeno talilo ili rastaljene soli. Rastaljeni materijal sadržan je u loncu peći koja je grijana uljem, plinom ili strujom. U nekim slučajevima električni grijači uronjeni su u samu kupku. Kod prvog tipa kupke, dijelovi koji se spajaju drže se zajedno te se uranjaju u rastaljeni dodatni materijal koji je prekriven talilom, te potom teče u spojeve kada dijelovi dosegnu temperaturu kupke. Talilo čisti radne komade te štiti dodatni materijal sprječavajući oksidaciju i gubitak isparljivih elemenata iz kupke. [1, 2]

Lonac ili retorta koja se koristi kod metode rastaljenog metala obično je izrađena od grafita. Najčešće je potrebno dijelove fiksirati kako bi se zadržala njihova pozicija. Zbog poteškoća prilikom zagrijavanja i održavanja metala na visokim temperaturama, rijetko se koriste dodatni materijali koji zahtijevaju temperaturu lemljenja iznad 1000°C. Iz tog razloga izbor dodatnih materijala ograničen je na mjedi i materijale na bazi srebra. [1]

Kod metode rastaljenog talila, dodatni materijal nalazi se blizu spojeva ili unutar njih te se zagrijava na potrebnu temperaturu uranjanjem u kupku rastaljenog talila. Tvrdo lemljenje u kupki rastaljene soli ima veći raspon primjene u odnosu na sve ostale postupke lemljenja. Može se koristiti na širokom rasponu materijala kao i lemljenje plamenom ali nije podložno istim maksimalnim temperaturnim ograničenjima. [1]

Nažalost sam proces nije fleksibilan. Vrsta soli korištena za određenu primjenu ovisi o jednostavnosti uklanjanja površinskih oksida sa površine osnovnog materijala i o temperaturi potrebnoj za lemljenje. [1]

Lemljenje u kupci rastaljenog talila naširoko se primjenjuje za tvrdo lemljenje aluminija i njegovih legura. Kupka pruža izvrsnu zaštitu protiv oksidacije metala koja se vrlo brzojavlja kod aluminija. Slika 9 prikazuje uranjanje aluminijskih dijelova u kupku rastaljenog talila. [1]



Slika 9: Uranjanje aluminijskih dijelova u rastaljeno talilo [13]

Lemljenje uranjanjem prouzrokuje manje deformacije nego lemljenje plamenom uslijed uniformnog zagrijavanja. Bez obzira na to može zahtijevati relativno kompleksne alate te se stoga primjenjuje na relativno srednje do visokoj proizvodnosti. Proces je pogotovo pogodan za dijelove male do srednje veličine sa mnogo skrivenih spojeva. [1]

4.7. Egzotermno lemljene

Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 sljedeće dvije metode nemaju svoju jedinstvenu oznaku već se mogu smjestiti pod ostale procese lemljenja ovisno o tome radi li se o tvrdom ili mekom lemljenju [3]:

- 93 ostali procesi tvrdog lemljenja
- 96 ostali procesi mekog lemljenja

Egzotermno lemljenje je specijalan proces ali se rijetko koristi zato što postoje puno ekonomičnije metode. Kod ovog procesa toplina potrebna za taljenje i tečenje dodatnog materijala proizlazi iz egzotermne kemijske reakcije koja je definirana kao bilo koja reakcija između dva ili više reaktanata koja uključuje slobodnu energiju sustava. Iako priroda pruža nebrojeno mnogo ovih reakcija, samo su reakcije između metala/metalnih oksida prikladne za primjenu kod egzotermnog lemljenja. [1]

4.8. Lemljenje laserom i elektronskim snopom

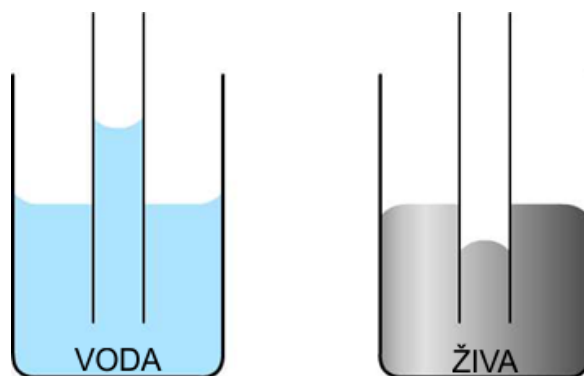
Lemljenje laserom i elektronskim snopom ima ograničenu primjenu. Laser se može koristiti kada je potrebno zagrijati jako malu lokaliziranu površinu poput lemljenja malih karbidnih vrhova na glavi printera. Elektronski snop može se koristiti za lemljenje smanjenjem fokusa zrake kako bi se osiguralo zagrijavanje šireg područja. Budući da se to izvodi u vakuumu nije moguće koristiti talilo i dodatni materijal mora biti odabran na način da vrlo malo ili uopće ne isparava tokom lemljenja. [1]

5. Kapilarnost i kvašenje lema

Kapilarnost je dominantan fizikalni fenomen koji osigurava dobro lemljenje kada su obje površine koje se spajaju mokre uslijed rastaljenog dodatnog materijala. Spoj mora biti ispravno razmaknut kako bi se omogućio učinkovit efekt kapilarnosti i sjedinjenje. [1]

Kapilarno privlačenje omogućava jednostavnu izradu nepropusnih spojeva. Kod ispravno pripremljenog spoja rastaljeni dodatni materijal obično je potpuno uvučen u prostor spoja bez praznina i šupljina kada se napravi u zaštićenoj atmosferi. [1]

Kapilarno privlačenje je i fizička sila koja upravlja ponašanjem tekućina u odnosu na krute površine u malim prostorima. Slika 10 prikazuje primjer kapilarnosti u dvije posude od kojih se u jednoj nalazi voda a u drugoj živa. U obje posude uronjene su dvije staklene ploče. Uslijed većih sila adhezije između tekućine i površine posude u odnosu na silu kohezije tekućine, dolazi do toga da površina tekućine nije potpuno vodoravna, već se uz rubove posude zakrivljuje tj. uzdiže. U navedenom primjeru što su staklene ploče bliže tada će se tekućina dizati u vis toliko visoko dokle god se težina izdignutog stupca tekućine ne izjednači silom kojom ga kapilarnost izdiže. Vrijedi i obratno, za neke kombinacije tekućina i materijala posude, tekućina će se kapilarno spuštati ispod razine koju bi normalno zauzimala kao što je prikazano sa desne strane na primjeru žive. [14]

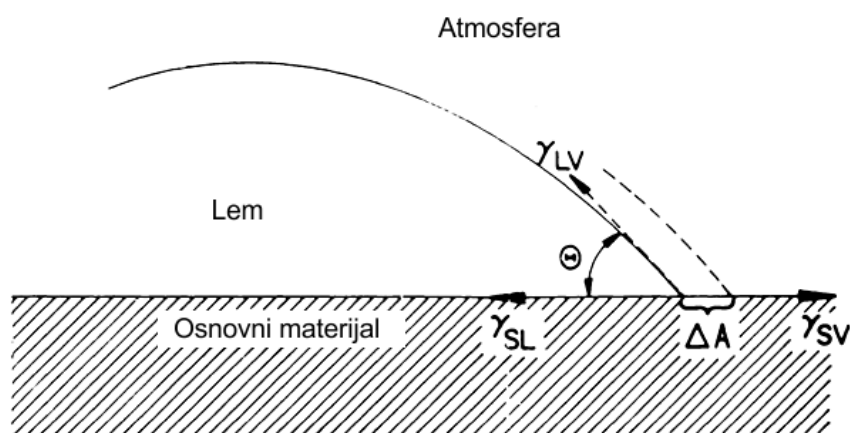


Slika 10: Princip kapilarnog privlačenja tekućina u staklenoj cjevčici [14]

Kvašenje je najbolje objašnjeno sljedećim primjerom. Ukoliko se kruti predmet uroni u tekućinu i dođe do kvašenja tada tanki sloj tekućine ostane na predmetu kada se on izroni iz iste. Sila adhezije između tekućine i predmeta veća je od sile kohezije unutar tekućine. U praktičnim uvjetima u odnosu na lemljenje, kvašenje implicira da se rastaljeni dodatni materijal širi po površini metala umjesto da se skuplja u kuglice.

Dokazano je da kvašenje ovisi o blagom površinskom legiranju osnovnog materijala sa dodatnim materijalom. Olovo na primjer ne legira sa željezom i iz tog razloga ga neće kvasiti. S druge strane kositar formira leguru sa željezom te će stoga lem na bazi kositra i olova kvasiti čelik. [1]

U praksi na tečenje dodatnog materijala utječu i fluidnost, viskoznost, pritisak, tlak isparavanja, gravitacija i metalurški utjecaji između dodatnog i osnovnog materijala. Eksperimentalno je proučavano da tekućine smještene na krute površine obično ne kvase površinu u potpunosti već ostaju u obliku kapljice sa definiranim kontaktnim kutom između tekućine i krutine kako je prikazano na slici 11. [1]



Slika 11: Prikaz sila površinske napetosti između osnovnog materijala, lema i atmosfere [1]

Young – Dupré jednadžba 1 povezuje određivanje promjene sile površinske napetosti u odnosu na promjenu sile, ΔF [N], koja je praćena malom promjenom pokrivenosti površine, ΔA [mm²] :

$$\frac{\partial F}{\partial A_{p,T}} = \gamma_{LV} + \gamma_{SL} - \gamma_{SV} \quad (1)$$

Gdje je γ_{LV} sila površinske napetosti između atmosfere i lema [N/mm²], γ_{SL} sila površinske napetosti između osnovnog materijala i lema [N/mm²] i γ_{SV} sila površinske napetosti između osnovnog materijala i lema [N/mm²]. Jednadžba 1 može se zapisati i kao [1]:

$$\Delta F = \Delta A (\gamma_{SL} - \gamma_{SV}) + \Delta A \gamma_{LV} \cos(\theta - \Delta\theta) \quad (2)$$

gdje je θ kontaktni kut [°].

U ravnotežnom položaju :

$$\lim_{\Delta A \rightarrow \Delta 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = 0 \quad (3)$$

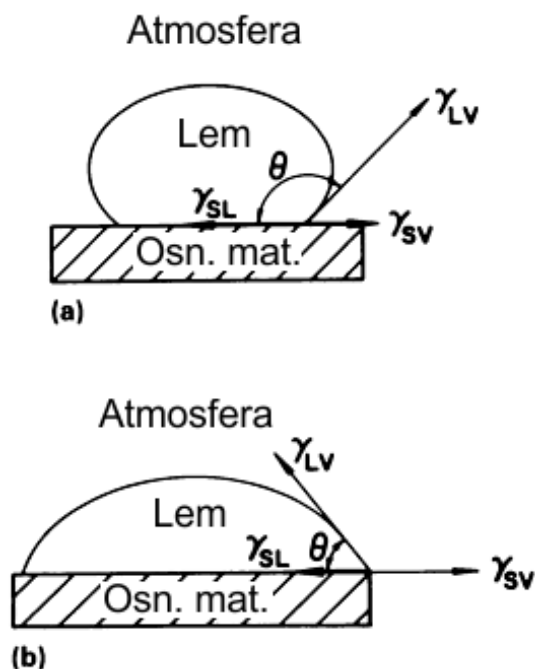
Kada se jednačba 3 uvrsti u jednačbu 2 dobije se:

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos \Theta = 0 \quad (4)$$

Jednačba 4 može se drugačije zapisati:

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} \cos \Theta \quad (5)$$

Iz jednačbi 4.4 i 4.5 vidljivo je kako je kontaktni kut veći od 90° kada je sila površinske napetosti između osnovnog materijala i lema veća od sile površinske napetosti između osnovnog materijala i atmosfere te lem ima tendenciju skupljanja u kuglicu. Vrijedi i obratno za kontaktni kut manji od 90° kada se lem širi i kvasi površinu kako je prikazano na slici 12. Slika 12a) prikazuje lem koji ne kvasi površinu dok slika 12b) prikazuje lem koji kvasi površinu zajedno sa pripadajućim kontaktnim kutom i silama površinske napetosti [1].



Slika 12: Prikaz lema koji kvasi (a) i lema koji ne kvasi površinu (b) [1]

Ovo razmatranje pokazuje važnost sila površinskih napetosti kod lemljenja. Ukoliko se želi da dodatni materijal uspješno formira spoj on mora kvasiti osnovni materijal. Balans sila površinskih napetosti mora biti takav da je kontaktni kut manji od 90° . [1]

Tipični primjer nekvašenja je kada se kapljica rastaljenog metala smjesti na nemetalnu površinu poput bakara oksida. Zato što ne postoji metalna veza na površini oksida tekući metal imat će malu tendenciju interakcije sa tom površinom. Metalna kapljica ponašat će se kao da je odbijena te će se nastojati skupiti u kuglu kako bi se minimizirala površina kontakta sa nemetalnom površinom. [1]

Kvašenje nije samo funkcija prirode dodatnog materijala već je i funkcija interakcije između materijala koji se spajaju. Postoje značajni dokazi da ukoliko se želi ostvariti dobro kvašenje rastaljeni metal mora biti u mogućnosti rastvoriti ili legirati sa metalom na koji teče. [1]

Dobro kvašenje i širenje rastaljenog dodatnog materijala na osnovni materijal nužno je kod procesa lemljenja zbog toga što mehanika procesa zahtijeva da se dodatni materijal dovede glatko, brzo i kontinuirano na mjesto spoja. Ukoliko uvjeti unutar kapilarnog prostora spoja ne omogućuju dobro kvašenje tada dodatni materijal neće biti uvučen u prostor kapilarnim privlačenjem. [1]

Kada se govori o karakteristikama kvašenja površine od strane dodatnog materijala postoje dva važna faktora koje bi trebalo razmotriti: opseg kvašenja i brzina kvašenja. Opseg kvašenja (indiciran kontaktnim kutom) je stanje ravnoteže vođene zakonima termodinamike i ovisi o površini i među površinskim energijama uključenima u vezu između tekućine i krutine. Brzina kvašenja (koliko brzo dodatni materijal kvasi i koliko se brzo širi) vođena je toplinskim zahtjevima sustava, mogućnostima izvora topline da isporuči toplinu, učinkovitosti talila, viskoznosti dodatnog materijala i kemijskoj reakciji koja se događa na mjestu vezivanja. [1]

Kvašenje je samo jedan aspekt procesa lemljenja. Drugi faktor koji utječe na kvašenje je čistoća površine koja se kvasi. Oksidni slojevi sprječavaju kvašenje i širenje kao i masnoća, prljavština i ostale kontaminacije koje sprječavaju dobar kontakt između dodatnog i osnovnog materijala. [1]

6. Osnovni materijal

Kvalitetan zalemljeni spoj postiže se pravilnim izborom i korištenjem odgovarajućih materijala i procesa. Osnovni metali obično se biraju kako bi se postigla specifična zahtijevana svojstva komponente. Ova svojstva mogu uključivati čvrstoću, duktilnost, električnu vodljivost, masu, korozijsku otpornost itd. Osnovni materijal ima glavni utjecaj na čvrstoću spoja. [1]

Osnovni materijal visoke čvrstoće proizvest će čvršće spojeve nego mekši osnovni materijal. Kada se tvrdo leme toplinski očvrstivi metali čvrstoća spoja nije jednostavno predvidiva. To se događa uslijed više kompleksnih metalurških reakcija između osnovnog i dodatnog materijala. Navedene reakcije mogu prouzrokovati promjene u sposobnosti metala da toplinski očvrstne i mogu stvoriti zaostala naprezanja. [1]

U slučaju kada različiti materijali tvore spoj mogu se stvoriti zazori u spoju koji se otvaraju ili zatvaraju kako teče postupak zagrijavanja i hlađenja uslijed različitih koeficijenata toplinskog istezanja. [1]

Nekoliko metalurških fenomena utječe na ponašanje lemljenih spojeva i u nekim slučajevima zahtijeva posebne procedure. Ovi fenomeni uključuju legiranje sa dodatnim materijalom; izlučivanje karbida; stvaranje pukotina uslijed naprezanja; krhkost uslijed vodika, sumpora i fosfora u materijalu i stabilnost oksidacije. [1]

Čvrstoća osnovnog materijala ima dubok utjecaj na čvrstoću zalemljenog spoja. Stoga se navedeno svojstvo mora pažljivo razmotriti kada se konstruira spoj sa specifičnim svojstvima. Neki materijali su lakši za lemljenje u odnosu na druge pogotovo sa specijalnim postupcima lemljenja. [1]

Kvalitetan zalemljeni spoj postiže se pravilnim izborom i korištenjem odgovarajućih materijala i procesa. Osnovni metali obično se biraju kako bi se postigla specifična zahtijevana svojstva komponente. Ova svojstva mogu uključivati čvrstoću, duktilnost, električnu vodljivost, masu, korozijsku otpornost itd. Kada se zahtijeva spajanje lemljenjem, lemljivost osnovnog materijala trebala bi biti faktor izbora. Izbor talila i priprema površine utjecat će na lemljivost osnovnih metala koji se spajaju. [1]

Lemljivost metala i legura nije samo rezultat kemijske plemenitosti kao što se može pretpostaviti zbog dobre lemljivosti plemenitih metala budući da se na njima ne stvaraju oksidni filmovi ili patina.

Iako kadmij i kositar lako oksidiraju oni se smatraju jednostavnima za lemljenje. S druge strane krom, nikal i aluminij teški su za lemljenje budući da jednostavno formiraju okside. Razlika je prionjivost i zaštitna priroda oksida koji se formiraju na kromu, niklu i aluminiju u usporedbi sa oksidima koji se formiraju na kositru i kadmiju. U tablici 2 grupirani su odabrani metali i legure prema njihovoj lemljivosti ukoliko se uzme u obzir prionjivost i priroda oksidnog filma koji se formira na njima. [1]

Valjalo bi napomenuti da se krom, nikal i aluminij redovito leme uz dobre rezultate ali se posebna pažnja mora posvetiti odabiru talila koje mora biti dosta aktivno. U većini slučajeva upotreba aktivnih talila je ili ograničena ili nije dozvoljena. Iz tog razloga materijali i legure koje je teško lemiti zahtijevaju posebna razmatranja kako bi se omogućila ponovljivost lemljenja. [1]

Tablica 2: Metali i legure u ovisnosti o jednostavnosti lemljenja [1]

Jednostavni za lemljenje	Platina Zlato Srebro Bakar Kadmij Kositar
Manje jednostavni za lemljenje	Olovo Nikal Mjed Bronca Rodij Berilij – Bakar
Teški za lemljenje	Galvanizirano željezo Kositar – Nikal Nikal – Željezo Ugljični čelik
Jako teški za lemljenje	Krom Nikal – Krom Nikal – Bakar Nehrđajući čelici
Najteži za lemljenje	Aluminij i aluminijske legure
Nije ih moguće lemiti	Berilij Titan

7. Dodatni materijal

Drugi materijal uključen u strukturu spoja je dodatni materijal. Nužnost dodatnog materijala da se tali ispod temperature skrućivanja osnovnog materijala samo je jedan od faktora koji utječe na njegov izbor. Može biti nužno za dodatni materijal da se tali ispod temperature pri kojoj dijelovi koji se leme gube čvrstoću ili iznad temperature na kojoj se disociraju ili reduciraju oksidi. [1]

Nužne karakteristike dodatnog materijala su [1]:

- dobro tečenje pri temperaturi lemljenja kako bi se osigurala kapilarnost i omogućila dobra distribucija istog
- stabilnost kako bi se izbjeglo preuranjeno otpuštanje elemenata sa nižom točkom taljenja u dodatnom materijalu
- mogućnost kvašenja površine osnovnog materijala i površine spoja
- niska razina isparavanja legiranih elemenata iz dodatnog materijala pri temperaturama tvrdog lemljenja
- mogućnost legiranja ili kombiniranja sa osnovnim materijalom s ciljem formiranja legure sa višom temperaturom tališta.

Način na koji dodatni materijal reagira i penetrira u osnovni materijal tijekom lemljenja ovisi o intenzitetu međusobnih difuzijskih procesa koji se odvijaju između oba materijala. Za primjene koje zahtijevaju čvrste spojeve za visoke temperature, u uvjetima visokih naprezanja tijekom eksploatacije (poput rotora turbina i dijelova mlaznih motora), općenito je pametno specificirati dodatni materijal koji posjeduje visoko svojstvo difuzije i topivosti sa osnovnim materijalom. Kada je sklop sastavljen od vrlo tankog osnovnog materijala (poput sačastih struktura i nekih izmjenjivača topline) dobra praksa nalaže specificiranje dodatnog materijala koji sadrži elemente sa niskom difuzijskom karakteristikom u odnosu na osnovni materijal. Difuzija kao normalni dio metalurškog procesa može doprinijeti dobrim lemljenim spojevima npr. visoko temperaturni metali tvrdo zalemljeni sa dodatnim materijalom na bazi nikla. [1]

Tijekom taljenja, sastav tekuće i krute faze dodatnog materijala mijenja se kako temperatura raste sa temperature skrućivanja na točku taljenja. Ukoliko dio koji se prvi rastali izađe na površinu, tada preostala kruta faza ima višu točku taljenja u odnosu na originalni sastav te se može dogoditi da se nikada ne otopi i da ostane kao talog.

Dodatni materijali sa uskim rasponom temperatura taljenja nemaju tendenciju razdvajanja i teku dosta slobodno u spojeve sa dosta uskim tolerancijama dok god su brzine difuzije i topivosti dodatnog materijala sa osnovnim niske (kao kod tvrdog lemljenja aluminija, korištenjem dodatnog materijala na bazi srebra, prilikom lemljenja bakra itd.). Svega nekoliko dodatnih materijala posjeduje uzak raspon taljenja. Dodatni materijali kod kojih su temperatura skrućivanja i temperatura taljenja dosta blizu obično ne izražavaju jaku tendenciju da postoje kao mješavina tekuće i krute faze. Oni trenutno teku i trebalo bi ih koristiti sa malim tolerancijama spojeva. [1]

Kako se temperature skrućivanja i taljenja odmiču jedna od druge tendencija za taljenjem raste, zahtijevajući mjere opreza prilikom primjene dodatnog materijala. Brzo zagrijavanje dodatnih materijala sa širokim rasponom taljenja ili njihova primjena na spojevima nakon što osnovni materijal dostigne temperaturu lemljenja smanjit će separaciju. Separacija ne može biti u potpunosti uklonjena, i dodatni materijali sa širokim rasponom temperatura taljenja, koji imaju tendenciju sporog tečenja, zahtijevat će šire tolerancije spojeva te će formirati velika zaobljenja na rubovima spoja. Nekoliko dodatnih materijala postaju dovoljno fluidni ispod stvarne temperature taljenja te se postižu zadovoljavajući spojevi iako stvarna temperatura taljenja nije postignuta. [1]

Kada je potrebno sporo tečenje npr. kod popunjavanja širih raspona, lemljenje se može postići sa rasponom temperatura taljenja dodatnog materijala. Ipak, temperature lemljenja obično su 10 do 93° C iznad temperature taljenja dodatnog materijala. Na stvarno potrebnu temperaturu lemljenja, kako bi se postiglo dobro popunjavanje spoja, utječu faktori poput brzine zagrijavanja, okoliša (atmosfera ili talilo), debljina dijelova, toplinska provodljivost dijelova koji se spajaju i tip spoja koji se izvodi. [1]

7.1. Smještanje i oblik dodatnog materijala

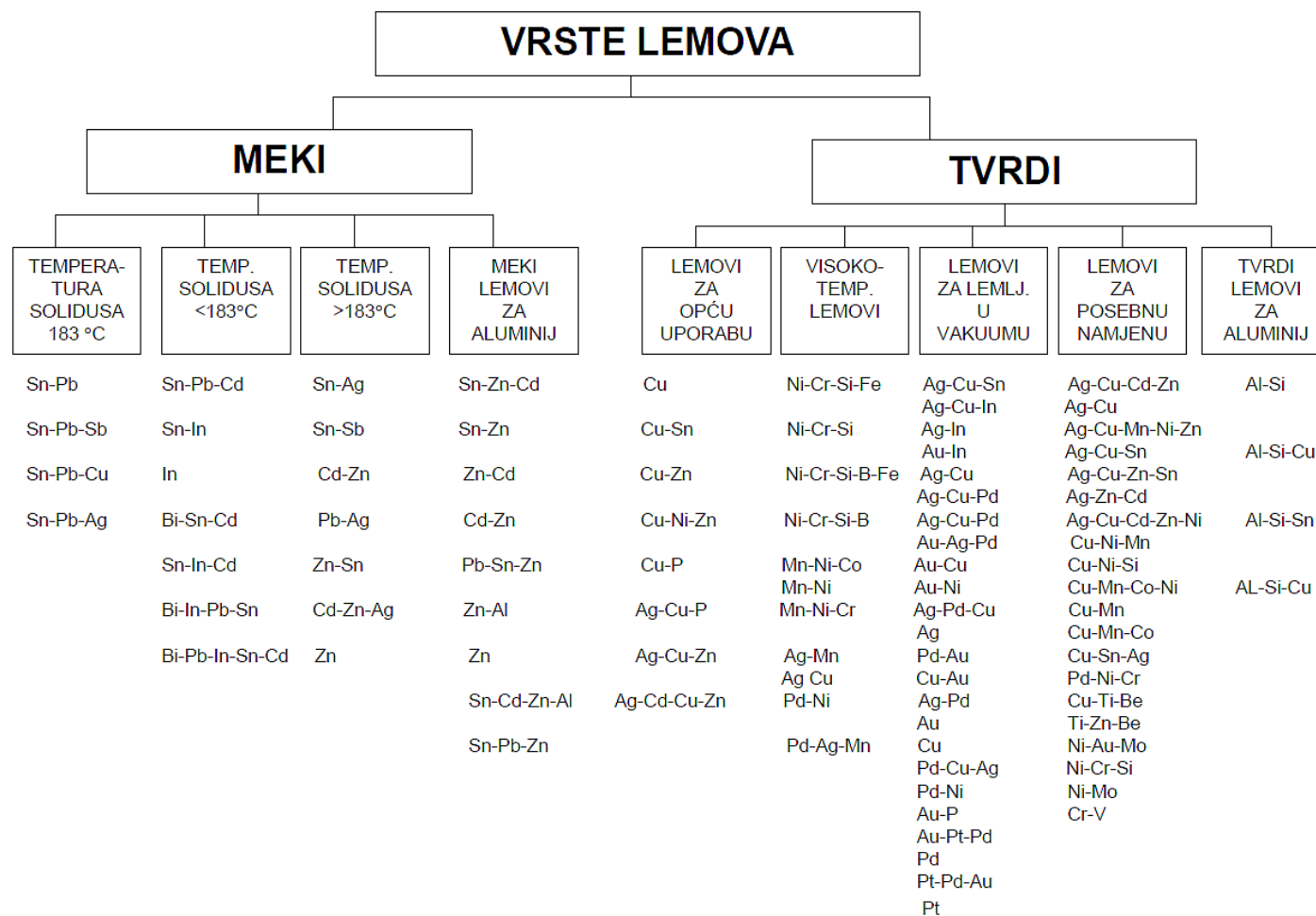
Smještanje dodatnog materijala važan je faktor prilikom konstruiranja spoja ne samo zbog činjenice da spoj mora biti dostupan za izabranu metodu spajanja, nego zbog (kod automatskih sustava zagrijavanja) činjenice da dodatni materijal mora zadržati svoju poziciju dok se ne rastali. Dodatni materijali dostupni su u različitim oblicima i odabir dodatnih materijala može ovisiti o obliku koji je prikladan za određenu konstrukciju spoja. [1]

Kad god je moguće, dodatni materijal trebao bi biti smješten na površinu koja se najsporije zagrijava kako bi se osiguralo njegovo kompletno taljenje. Iako lemljenje ne ovisi o gravitaciji, gravitacija se može koristiti kako bi se potpomoglo tečenje dodatnog materijala, pogotovo za one dodatne materijale koji imaju širok raspon između svojih temperatura skrućivanja i taljenja. Dodatni materijali mogu biti izabrani da popune široke raspone ili da teku kroz spojeve kod kojih razmaci mogu varirati, npr. oko ugla. Ukoliko gibanje između dijelova koji se spajaju nije važno ili može biti ručno ispravljeno (kroz samo uglavljivanje ili korištenjem naprava za fiksiranje nakon što je dodatni materijal rastaljen), dodatni materijal trebao bi biti smješten izvan spoja te bi mu se trebalo omogućiti da poteče u njega. Ne bi trebao biti smješten između dijelova koji se spajaju. Ukoliko je moguća erozija tankih dijelova koji se spajaju tada se dodatni materijal treba smjestiti na deblje dijelove, koji se zagrijavaju sporije, tako da tečenje ide prema tanjim dijelovima. [1]

Proizvodnja dodatnih materijala drastično se promijenila budući da se odmaknula od jednostavne proizvodnje žice na proizvodnju predoblika i paste kako bi se zadovoljile potrebe različitih tehnika lemljenja kako je prikazano na slici 13. Dodatni materijal može se primijeniti na nekoliko načina [1]:

- mješavina praha i talila, poznatija kao pasta za lemljenje može se aplicirati na spojeve metodom sitotiska i metodom korištenja matrice, ili korištenjem naprava koje apliciraju točkice paste jednostavnim pneumatskim sustavom ili ručnom metodom uz pomoć kista. Ova metoda pogotovo je korisna kada se leme SMT komponente u elektrotehnici i ne može se koristiti kod lemljenja stojnim valom
- dijelovi mogu biti pokositreni tj. unaprijed prevučeni slojem dodatnog materijala uranjanjem u rastaljeni metal
- dodatni materijal može biti u obliku prstena, podloške ili cjevčica koje se smještaju na ili uz dijelove koji se spajaju. Ovi praoblici mogu biti sa ili bez talila.

Posljednja dva načina dodavanja dodatnog materijala mogu se koristiti i na područjima industrije elektronike gdje strojno lemljenje nije moguće. Mali prsteni dodatnog materijala smještaju se preko dugačkih pinova na matičnoj ploči tamo gdje se zlatna prevlaka kontaktnih elemenata ne smije prevući sa dodatnim materijalom za lemljenje. Podloške se smještaju ispod vijaka koji se leme na masu. Žice se kositre prije lemljenja sa pokositrenim spojnicama. [1]



Slika 14: Najčešće korišteni dodatni materijali za lemljenje[6]

8. Talila

Uspješno uspostavljanje spoja zahtijeva da rastaljeni dodatni materijal ostvari kontakt sa metalom na koji ili koji se spaja da se može inicirati kvašenje. Kada se metali izlože zraku događaju se kemijske reakcije. Brzina odvijanja tih reakcija ubrzava se sa porastom temperature. Najčešća reakcija je stvaranje oksida, iako se mogu u nekim slučajevima stvoriti nitridi i karbidi. Brzina formiranja oksidnog sloja varira u ovisnosti o sastavu metala i prirodi oksidnog sloja. Tendencija stvaranja oksida, struktura, debljina i otpornost uklanjanju ili daljnjem stvaranju oksida su faktori koje treba uzeti u obzir. Stvaranje oksida u zraku na nekim metalima poput aluminijskih odvija se gotovo trenutno čak i na sobnoj temperaturi. U skoro svim slučajevima površinski oksidni slojevi u kombinaciji sa ostalim spojevima stvaraju barijeru koja sprječava formiranje zalemljenog spoja. [1, 2]

Talilo je kemijski spoj (tekućina, kruti ili plinoviti materijal) koja pored čišćenja površine, kada se zagrije, potpomaže ili ubrzava kvašenje metala. Rastapanje i uklanjanje oksida tijekom postupka lemljenja je najčešća funkcija talila. Kako ne bi smanjilo tečenje metala talilo mora biti tekuće te ga se mora moći istisnuti iz spoja uz pomoć rastaljenog dodatnog materijala. Iz tog razloga su sposobnost kvašenja i viskoznost talila na temperaturi lemljenja važna svojstva. [1, 2]

Talila nisu namijenjena za primarno uklanjanje oksidnih slojeva, premaza, ulja, masti, prljavštine ili drugih materijala sa dijelova koji se leme. Svi dijelovi prije lemljenja moraju biti podvrgnuti prikladnim postupcima čišćenja koji ovise o samim osnovnim materijalima. [1, 2]

Odabir talila obično ovisi o jednostavnosti kojom se osnovni materijal može lemiti tj. o njegovoj lemljivosti. Talila na bazi kolofonija koriste se sa lemljivim osnovnim materijalom ili metalima koji su prevučeni sa lemljivim metalom ili sa metalima koji su prevučeni sa lemljivom završnom prevlakom. Anorganska talila često se pak primjenjuju na metalima poput nehrđajućih čelika. [2]

Neki dodatni metali poput legure bakra i fosfora posjeduju svojstvo da su sami sebi talilo na određenim legurama. U navedenom primjeru legura bakra i fosfora djeluje kao talilo prilikom lemljenja bakra. U većini slučajeva primjena dodatnih materijala sa navedenim svojstvom rezultirat će spojem koji je kvalitetom usporediv sa spojem koji je napravljen uz korištenje talila. Legura bakra i fosfora posjeduje navedeno svojstvo isključivo u rastaljenom stanju te će oksidirati tijekom ciklusa grijanja i hlađenja. Primjena dodatnog talila preporučljiva je kod spajanja većih dijelova ili kada se koriste dulja vremena zagrijavanja. Dodatni materijali koji u sebi sadrže litij potpomažu kvašenje nehrđajućih i ostalih specijalnih čelika. Oni se općenito primjenjuju sa zaštitnim atmosferama. [2]

Tablica 3 prikazuje relativnu lemljivost različitih metala ili legura u ovisnosti o talilu. Iz nje je vidljivo kako se prilikom lemljenja većine materijala mogu koristiti talila na bazi kolofonija kao i organska i anorganska talila. Izuzetak je aluminij i njegove legure kao i lijevano željezo, Inconel i Nikrom koji zahtijevaju posebna talila i tehnike lemljenja. [2]

Tablica 3: Relativna lemljivost metala i legura u ovisnosti o talilu [1]

Osnovni metal, legura ili prevlaka	Vrsta talila				Lemljenje nije preporučeno
	Na bazi Kolofonija	Organska	Anorganska	Posebna	
Aluminij				X	
Aluminijska bronca				X	
Berilij					X
Berilij - Bakar	X	X	X		
Mjed	X	X	X		
Kadmij	X	X	X		
Lijevano željezo				X	
Krom					X
Bakar	X	X	X		
Bakar – Krom			X		
Bakar – Nikal	X	X	X		
Bakar – Silicij			X		
Zlato	X	X	X		
Inconel				X	
Olovo	X	X	X		
Magnezij					X
Mangan – Bronca					X
Monel		X	X		
Nikal		X	X		
Nikal – Željezo		X	X		
Nikrom				X	
Paladij	X	X	X		
Platina	X	X	X		
Rodij			X		
Srebro	X	X	X		
Nehrdajući čelik		X	X		
Čelik			X		
Kositar	X	X	X		
Kositar – Bronca	X	X	X		
Kositar – Olovo	X	X	X		
Kositar – Nikal		X	X		
Kositar – Cink	X	X	X		
Titan					X
Cink		X	X		
Cink odljevak					X

8.1. Podjela talila

Podjela talila za tvrdo lemljenje definirana je normom HRN EN 1045:2001. Navedena norma specificira podjelu talila koja se primjenjuju za tvrdo lemljenje metala i karakterizira talila na osnovu njihovih svojstava i primjene, te daje zdravstvena sigurnosna upozorenja i stanje u kojem se ona isporučuju [17].

Norma definira podjelu talila u dvije skupine: FH i FL talila. Talila sa oznakom FH primjenjuju se za tvrdo lemljenje teških metala (čelici, nehrđajući čelici, bakar i njegove legure, nikal i njegove legure, plemeniti metali, molibden i volfram). Talila oznake FL primjenjuju se za tvrdo lemljenje aluminija i njegovih legura. [17]

8.1.1. Talila za tvrdo lemljenje teških metala (oznaka FH)

Talila sa oznakom FH pokrivaju sedam vrsta talila. Oznaka svake vrste sastoji se od slovne oznake klase FH iza koje slijede dvije znamenke.

- FH 10

Talila sa oznakom FH 10 namijenjena su za primjenu u temperaturom rasponu od 550°C do otprilike 800°C. Sadrže spojeve bora, jednostavne i kompleksne floride i koriste se za tvrdo lemljenje pri temperaturama iznad 600°C. To su talila opće namjene i ostatak nakon lemljenja je obično korozivan i mora biti uklonjen pranjem ili kiseljenjem. [18]

- FH 11

Talila sa oznakom FH 11 namijenjena su za primjenu u temperaturom rasponu od 500°C do 800°C. Sadrže spojeve bora, jednostavne i kompleksne fluoride i kloride te se koriste za tvrdo lemljenje pri temperaturama iznad 600°C. Ova talila prvenstvenog se primjenjuju za tvrdo lemljenje legura, bakra i aluminija. Ostatak talila nakon lemljenja obično je korozivan i mora biti uklonjen pranjem ili kiseljenjem. [17]

- FH 12

Talila sa oznakom FH 12 namijenjena su za primjenu u temperaturom rasponu od 550°C do 850°C. Sadrže spojeve bora, elementarni bor i jednostavne i kompleksne fluoride te se primjenjuje za tvrdo lemljenje pri temperaturama iznad 600°C. Ova talila se uglavnom primjenjuju za tvrdo lemljenje nehrđajućih čelika i drugih legiranih čelika i tvrdih metala. Ostatak talila nakon lemljenja je obično korozivan i mora biti uklonjen pranjem ili kiseljenjem. [17]

- FH 20

Talila sa oznakom FH 20 namijenjena su za primjenu u temperaturom rasponu od 770°C do otprilike 1000°C.

Sadrže spojeve bora i fluorida te se primjenjuju za tvrdo lemljenje pri temperaturama iznad 750°C. Ovo su talila opće primjene i ostatak talila nakon lemljenja je obično korozivan i mora biti uklonjen pranjem ili kiseljenjem. [17]

- FH 21

Talila sa oznakom FH 21 namijenjena su za primjenu u temperaturom rasponu od 750°C do otprilike 1100°C. Sadrže spojeve bora te se primjenjuju za tvrdo lemljenje pri temperaturama iznad 800°C. To su talila opće primjene čiji ostatak nakon lemljenja obično nije korozivan ali ga se može ukloniti mehanički ili kiseljenjem. [17]

- FH 30

Talila sa oznakom FH 30 namijenjena su za primjenu u temperaturom rasponu od 1000°C naviše. Sadrže spojeve bora, fosfate i silikate te su prvenstveno namijenjeni za primjenu sa dodatnim materijalom na bazi bakra i nikla. Ostatak talila nakon lemljenja obično nije korozivan ali ga se može ukloniti mehanički ili kiseljenjem. [17]

- FH 40

Talila sa oznakom FH 10 namijenjena su za primjenu u temperaturom rasponu od 600°C do otprilike 1000°C. Sadrže kloride i fluorida ali ne sadrže bor i njegove spojeve te su namijenjena za primjene gdje nije dozvoljena prisutnost bora. Ostatak talila nakon lemljenja obično je korozivan te mora biti uklonjen pranjem ili kiseljenjem. [17]

8.1.2. Talila za lemljenje lakih metala (oznaka FL)

Talila sa oznakom FL pokrivaju dvije vrste talila. Oznaka svake vrste sastoji se od slova koja označavaju klasu FL nakon čega slijede dvije znamenke. Ova talila imaju efektivnu radnu temperaturu od 550°C nadalje. [17]

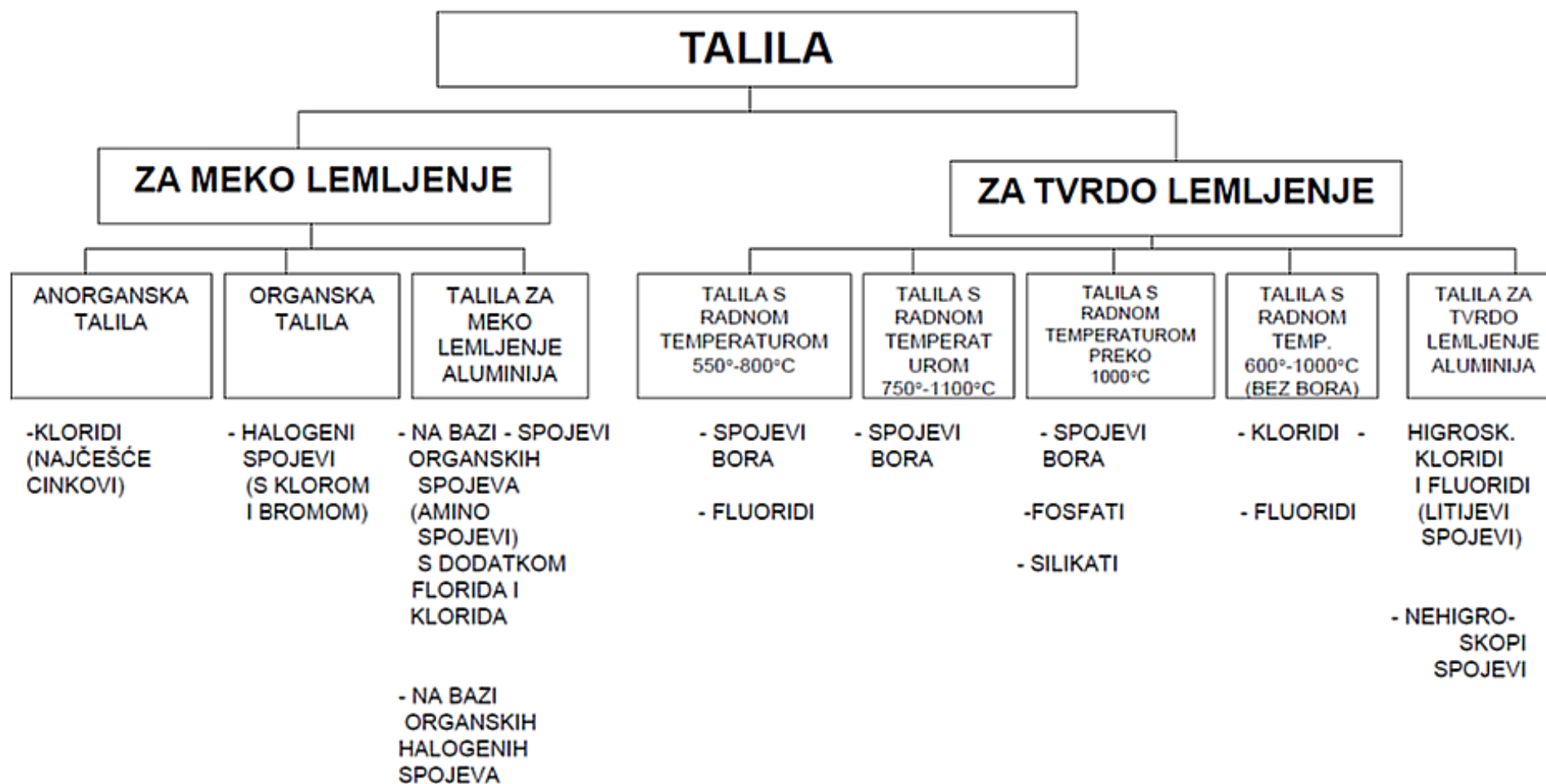
- FL 10

Talila sa oznakom FL 10 sadrže higroskopne kloride i fluorida te se primarno sastoje od litijevih spojeva. Ostatak talila nakon lemljena je korozivan te ga se mora ukloniti ispiranjem ili kiseljenjem. [17]

- FL 20

Talila sa oznakom FL 20 sadrže nehigroskopne kloride. Ostatak talila nakon lemljena obično nije korozivan te ga se može ostaviti na radnom komadu ali se spoj mora zaštititi od vode i vlage. [18]

Slika 15 prikazuje podjelu najčešće korištenih spojeve koji se koriste za talila za meko i tvrdo lemljenje. Talila na bazi kolofonija su izostavljena sa prikaza međutim ona se prvenstveno koriste za meko lemljenje.



Slika 15: Prikaz talila koja se najčešće primjenjuju u postupima lemljenja [6]

8.2. Sastav talila

Mnogo kemijskih spojeva korisno je prilikom formuliranja talila. Talila specifičnog sastava su kompleksni spojevi formulirani za specifične primjene. Kada se talila zagrijevaju odvijaju se različite reakcije između sastojaka talila. Novi spojevi mogu se formirati na temperaturama lemljenja i mogu posjedovati potpuno različita kemijska i fizikalna svojstva u odnosu na originalne spojeve pri sobnoj temperaturi. [2]

Na primjer: ukoliko je fluoroborat sastojak talila može doći do stvaranja fluorida uslijed reakcije sastojaka. Brizne reakcija talila sa kisikom, osnovnim materijalom, dodatnim materijalom i bilo kojim stranim materijalom koji je prisutan u spoju rastu sa temperaturom i količinom taloga. Iz tog razloga sastojci talila moraju biti pažljivo odabrani da odgovaraju zahtjevima lemljenja uključujući vrijeme i temperaturu. Utjecaj talila na osnovni materijal mora biti ograničen na brzu reakciju sa metalnim oksidima kako bi se omogućilo zadovoljavajuće formiranje spoja. Aktivni spojevi halida poput klorida i fluorida su na primjer nužni kod talila za lemljenje aluminija ili drugih aluminija. Neka posebno aktivna talila moraju biti napravljena prije same primjene kako bi se izbjegle kemijske reakcije između sastojaka tijekom skladištenja. [2]

Neki od najčešćih sastojaka mineralnih talila za tvrdo lemljenje su [2]:

- Spojevi sa borom

Borati poput kalij tetraborida ($K_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$) su spojevi sa borom korisni prilikom formuliranja talila koja se koriste pri višim temperaturama. Posjeduju dobru apsorpciju oksida i pružaju zaštitu od oksidacije kroz duge vremenske periode. Većina spojeva sa borom tali se pri temperaturama od oko $760^\circ C$ naviše. Posjeduju relativno visoku viskoznost. Obično se miješaju sa drugim solima kako bi se smanjila viskoznost talila. Talila namijenjena za lemljenje pri visokim temperaturama obično sadrže povišene udjele spojeva sa borom. [2]

- Bor kao element

Elementarni bor u obliku finog praha može se dodati u talilo kako bi se produljila temperatura i vijek trajanja talila. [2]

- Boraks

Kemijski spoj bora ($Na_2O \cdot 2B_2O_3$) sa visokom temperaturom taljenja koji je aktivan na visokim temperaturama lemljenja. [2]

- Fluoroborati

Fluoroborati su kemijski spojevi fluora i bora koji se primjenjuju sa ostalim spojevima bora ili sa alkalnim spojevima poput karbonata (npr. kalij karbonat K_2CO_3). Fluoroborati reagiraju slično kao i ostale mješavine fluorida i spojeva sa borom. Oni ne pružaju zaštitu od oksidacije u istoj mjeri kao spojevi sa borom.

Teku bolje u rastaljenom stanju i imaju veću sposobnost rastvaranja oksida. Povezana skupina spojeva su fluora, silicija i bora koji imaju višu točku taljenja u odnosu na fluoroborate, pružaju dobru pokrivenost te poboljšavaju prionjivost na površinu. Njihova visoka točka taljenja ograničava im primjenu. [2]

- Fluoridi

Fluoridi (npr. kalij fluorid KF) reagiraju sa većinom metalnih oksida pri povišenim temperaturama te su stoga česti sastojak spojeva za čišćenje u samom talogu. Posebno su važni u primjenama gdje se mogu susresti oksidi aluminija i kroma. Fluoridi se često dodaju kako bi se povisila fluidnost rastaljenih borata što dovodi do boljeg raspoređivanja istih i poboljšanja kapitalnog tečenja rastaljenog dodatnog materijala. [2]

- Kloridi

Kloridi (npr. kalij klorid KCl) funkcioniraju na sličnom principu kao i fluoridi ali imaju niži efektivni temperaturni raspon. Moraju se koristiti razborito budući da pri povišenim temperaturama imaju tendenciju da oksidiraju radni komad. Tale se na nižim temperaturama te mogu sniziti temperaturu taljenja talila na bazi fluorida. [2]

- Borna kiselina

Borna kiselina HBO_2 glavni je sastojak talila za tvrdo lemljenje. Često se koristi u hidriranom obliku (H_3BO_3) koji ima nešto višu točku taljenja. Ima svojstvo olakšavanja uklanjanja ostataka talila nakon lemljenja. Točka taljenja najbolje je opisana kao ispod točke taljenja borata ali iznad točke taljenja fluorida. [2]

- Alkali

Kalij i natrij hidroksid (KOH i NaOH) primjenjuju se štedljivo ukoliko se uopće i dodaju u talilo zbog svojih rastvarajućih svojstava. Čak i male količine ugrađene u talilo mogu kreirati poteškoće u vlažnoj okolini i mogu značajno ograničiti vrijeme skladištenja talila. Alkali povisuju korisnu radnu temperaturu talila. Mogu povoljno djelovati kao dodatak talilima koja se koriste za lemljenje alatnih čelika koji sadrže molibden. [2]

- Tvari koje potpomažu kvašenje

Tvari koje potpomažu kvašenje dodaju se u paste, suspenzije i tekuća talila kako bi olakšale tečenje i širenje talila na radni komad prije lemljenja. Prisutne su u količinama koje nemaju negativnih utjecaja na normalnu funkciju talila. [2]

- Voda

Voda je prisutna kao izvor hidratacije u kemikalijama koje se koriste za formuliranje talila ili kao poseban dodatak s ciljem stvaranja paste ili tekućine. Voda koja se koristi za formiranje paste mora biti provjerena da ne sadrži nečistoće koje bi mogle negativno utjecati na proces i ne smije biti tvrda. Ukoliko dostupna voda nije prikladna potrebno je koristiti deioniziranu ili destiliranu vodu. [2]

- Ostala otapala

Ostala otapala poput alkohola ponekad se dodaju u komercijalna talila od strane krajnjeg korisnika. To se radi s ciljem dobivanja suhog premaza talila prije lemljenja. Ostala otapala omogućuju brže sušenje nego talila bazirana na vodi. [2]

8.3. Odabir talila

Neki faktori prilikom odabira talila su [2]:

- za lemljenje uranjanjem voda (uključujući i vodu za hidrataciju) mora biti uklonjena (obično pregrijavanjem) prije uranjanja u rastaljenu kupku;
- kod otpornog lemljenja mješavina talila mora omogućiti prolazak struje. To obično zahtijeva razrijeđeno tj. mokro talilo;
- efektivni temperaturni raspon talila mora uključivati temperature lemljenja za specifični dodatni materijal koji se koristi;
- kontrolirana atmosfera obično zahtijeva manje aktivna talila ili manju količinu istog;
- jednostavnost uklanjanja ostatka talila nakon lemljenja i posljedice nepotpunog uklanjanja trebaju biti razmotrene;
- korozivni utjecaj na osnovni ili dodatni materijal treba biti minimaliziran;
- sposobnost talila da izdrži produžena vremena na temperaturi lemljenja bez raspadanja.

8.4. Oblik i metode apliciranja talila

Talila za lemljenje općenito su dostupna u obliku praha, paste, suspenzije ili tekućine. Izabrani oblik ovisi o pojedinačnim zahtjevima, procesu i proceduri lemljenja [2].

Često se talilo u obliku praha miješa sa vodom ili alkoholom kako bi se dobila pasta. Prah može biti korišten i u suhom obliku nanesen na spoj iako prionjivost u tom slučaju nije dobra kada je spoj hladan. Suho talilo u obliku praha može se nanositi na zagrijan kraj šipke dodatnog materijala na način da se ista umoči u spremnik s talilom te se nanese na predgrijane površine prije lemljenja. Talilo u obliku praha koristi se i za izradu kupke za lemljenje uranjanjem. [2]

Pasta je najčešće korišten oblik za apliciranje talila. Obično se nanosi kistom na osnovni materijal. Može biti nanosena uz dobru prionjivost na spoj i dodatni materijal prije lemljenja. Nisko viskozna suspenzija ili razrijeđena pasta koristi se kada se talilo nanosi raspršivačem na spoj. Talilo se također nanosi i uranjanjem osnovnog materijala u pastu ili suspenziju prije sklapanja. Opseg razrijeđenosti kontrolira količina talila koje se koristi. Određeni sastojci u talilu potpuno će se rastvoriti u vodi kako bi se dobila tekuća otopina koja se naziva tekuće talilo. [2]

Veličina čestica suhog talila ili paste važna je zato što će talilo bolje odraditi svoj posao ukoliko su čestice male i dobro izmiješane. Predgrijavanje paste ili tekućeg talila može povoljno djelovati na primjenu. Ponekad se dodatni materijal u obliku praha umiješa u pastu kako bi se zajedno postavili na mjesto spoja. [2]

8.5. Uklanjanje talila

Ostatak talila najčešće se uklanja kako bi se spriječila korozija uslijed preostalih aktivnih kemikalija. Ostatak dobiven iz talila, pogotovo kada se dogodilo značajno uklanjanje oksida je oblik stakla. Manje formiranje stakla omogućava lakše uklanjanje ostatka talila. Iz tog razloga radni komad treba biti čist prije dodavanja talila, treba koristiti dovoljno talila te se treba izbjegavati pregrijavanje radnog komada. [2]

Uklanjanje talila sa ispravno očišćenih zalemljenih dijelova može biti postignuto pranjem u vrućoj vodi uz lagano četkanje. Ovo ispiranje trebalo bi se odraditi odmah nakon postupka lemljenja. Nakon ispiranja preporuča se detaljno sušenje radnog komada. [2]

Uklanjanje ostatka talila može biti ubrzano uranjanjem spoja u vodu prije nego što se potpuno ohladi sa temperature lemljenja. Navedeni proces proizvest će temperaturna naprezanja koja će raspuknuti ostatak. Navedena metoda ne smije se koristiti ukoliko može dovesti do toplinskog naprezanja u samome spoju zato što ona mogu negativno utjecati na čvrstoću spoja. [2]

Za ostatak talila koje se teško uklanja ili sa površina koje će se bojati potrebne su posebne operacije za otklanjanje ostataka poput kiseljenja ili kemijskog čišćenja. Za uklanjanje ostatka talila mogu se koristiti i mehaničke metode koje uključuju različite četke... Potrebno je uzeti u obzir da li je metoda čišćenja prikladna tj. kompatibilna sa ostalim materijalom budući da su neki mekani metali poput aluminija osjetljivi na određene mehaničke metode čišćenja. [2]

Nakon mehaničkog čišćenja može biti poželjno očistiti površinu sa različitim tekućinama. Različite grupe metala često znaju imati poseban tretman nakon čišćenja ostatka talila kako bi im se istaknula određena svojstva. Na primjer sklopovi od aluminija prolaze kroz proces kemijske pasivacije površine kako bi im se poboljšala korozijska otpornost. [2]

9. Priprema površine osnovnog materijala

Čista površina slobodna od oksida imperativ je za osiguravanje ujednačene kvalitete i ispravnosti lemljenih spojeva. Nečista površina onemogućit će tečenje dodatnog materijala i otežat će kapilarnu privlačnost, što čini lemljenje teškim ili nemogućim i doprinosi formiraju loših spojeva. Materijali poput ulja, masti, boje, tragova olovke, lubrikanata za izvlačenje ili strojnu obradu, atmosferske prašine, oksida ili hrđe moraju biti uklonjeni prije lemljenja. Važnost čišćenja ne može biti prenaglašena kod osiguravanja dobrih zalemljenih spojeva. [1]

Lemljene se treba izvoditi što je prije moguće nakon što je materijal očišćen. Duljina vremena kod kojeg čišćenje ostaje efektivno ovisi o samome materijalu, atmosferskim uvjetima, skladištenju i rukovanju materijalom i ostalim faktorima. Operacije čišćenja često su kategorizirane u dvije kategorije kemijsko ili mehaničko. Kemijsko čišćenje je najbolji način uklanjanja svih tragova ulja ili masti. [1]

Za uklanjanje ulja ili masnoće sa površine preporuča se korištenje otapala ili lužina. Od metoda uklanjanja ulja i masti uz pomoć otapala koriste se pare otapala na bazi trikloretilena kako bi se minimizirao zaostali film na površini. U nedostatku opreme za uklanjanje ulja i masti uz pomoć isparavanja, uranjanje u tekuća otapala ili otopine detergenta prikladna je procedura. Za tu primjenu naširoko se koriste zagrijani detergentsi na bazi alkala. Sve otopine za čišćenje moraju se temeljito ukloniti sa površine prije lemljenja. Ostaci od ispiranja tvrdom vodom mogu utjecati na sam postupak lemljenja. [1]

Svrha čišćenja kiselinom uklanjanje je hrđe, ljušaka, oksida i sulfida sa metala kako bi se dobila čista površina za lemljenje. Prikladne su sve anorganske kiseline (klorovodična, sumporna, fosforna, dušična i fluorovodična kiselina) samostalno ili kao mješavine. Međutim najčešće korištene kiseline su klorovodična i sumporna. Nakon čišćenja kiselinom dijelovi bi trebali biti temeljito isprani vrućom vodom i potom osušeni što je brže moguće. [1]

Odabir sredstava za kemijsko čišćenje ovisi o prirodi onečišćenja, osnovnom materijalu, stanju površine i konstrukciji spoja. Bez obzira na prirodu sredstva za čišćenje ili metodu čišćenja, važno je da se sav zaostali film na površini adekvatno ispere sa dijelova koji se čiste kako bi se spriječilo formiranje ostalih jednako nepoželjnih filmova na površinama. [1]

Oksidi i nečistoće koje ne mogu biti uklonjene navedenim sredstvima uklanjaju se na druge načine tj. mehanički, poput brušenja, turpijanja, čišćenja četkom, ili bilo kojim oblikom strojne obrade uz uvjet da se ne izmjene tolerancije spoja.

Prilikom brušenja površina dijelova koji se leme, potrebno je osigurati da rashladna tekućina bude čista i slobodna od nečistoća kako bi se spriječilo utiskivanje istih u površine. [1]

Kada se površine dijelova pripremaju tehnikama pjeskarenja ili sačmarenja potrebno je razmotriti nekoliko faktora. Ovi faktori su razlog primjene tehnika pjeskarenja ili sačmarenja na dijelove koji se leme. Jedan je uklanjanje bilo kojeg oksidnog filma dok je drugi pogrublјivanje površina koje se spajaju kako bi se povisilo kapilarno privlačenje dodatnog materijala. Materijal koji se koristi tijekom procesa mora biti čist i ne smije ostavljati nikakav depozit na površinama koje se spajaju koji bi onemogućio tečenje dodatnog materijala. Čestice materijala trebale bi biti uglate umjesto kuglastih, tako da su dijelovi blago pogrublјeni nakon uklanjanja nečistoća. Proces ne bi smio deformirati ili oštetiti osjetljive dijelove. Metode mokrog pjeskarenja i slične metode zahtijevaju oprez prilikom korištenja budući da može doći do moguće kontaminacije površine. Sačmarenje je često učinkovito te se preferira u odnosu na pjeskarenje zato što se na taj način izbjegava ugradnja čestica pijeska u površinu što ometa tečenje dodatnog materijala. Mehaničko čišćenje ne preporučuje se na mekše metale poput bakra. [1]

Često je samo mehaničko čišćenje adekvatno za pripremu površine. U slučajevima koji pak zahtijevaju kemijsko čišćenje, nakon operacije čišćenja može slijediti operacija zaštitnog elektro prevlačenja. [1]

Druga metoda zaštite površine je korištenje krutog ili tekućeg talila za lemljenje. Talilo često omogućava najjednostavniju metodu održavanja i proizvodnje čiste površine. U tom slučaju, konstrukcija mora ne samo osigurati lagan ulazak talila već mora omogućiti i njegovo ispiranje od strane dodatnog materijala koji ulazi u spoj. Ostatak talila nakon lemljenja može ponekad biti težak za uklanjanje i čišćenje sa površine. Samo talilo, iako se može koristiti za čišćenje, ne može biti zamjena za adekvatno čišćenje mehaničkim ili kemijskim putem. [1]

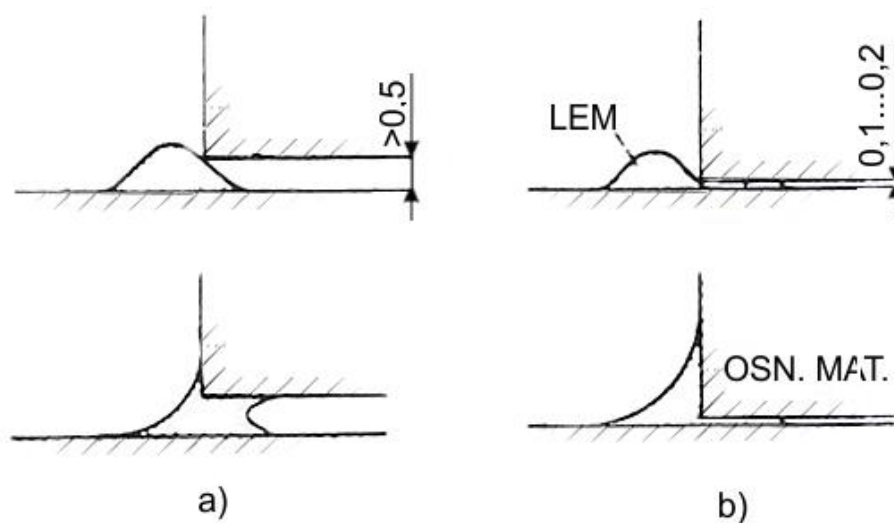
Pored čistoće površine postoji još jedan važan faktor koji određuje jednostavnost i ujednačenost tečenja dodatnog materijala pod nazivom hrapavost površine. Općenito gledano tekućina koja kvasi glatku površinu kvasit će još više površinu koja je gruba. Gruba površina modificirat će tečenje dodatnog materijala iz laminarnog u turbulentno, produljujući vrijeme tečenja i povisujući vjerojatnost legiranja i ostalih interakcija. Površine često nisu u potpunosti planarne te će u nekim slučajevima pogrublјivanje površine poboljšati uniformnost tolerancija spoja. Gruba površina ima niz brjegov i kanala koji izazivaju turbulentno tečenje. Ove neregularnosti površine simuliraju hvataljke koje sprječavaju tečenje dodatnog materijala. [1]

Može postojati i obrnuti zahtjev da dodatni materijal ne teče na neke površine. Iz tog razloga razvijeni su materijali koji blokiraju tj. sprječavaju tečenje, ali konstrukcija mora omogućiti jednostavnu primjenu istih bez kontaminiranja površina koje se spajaju. [1]

10. Zračnost između spojeva

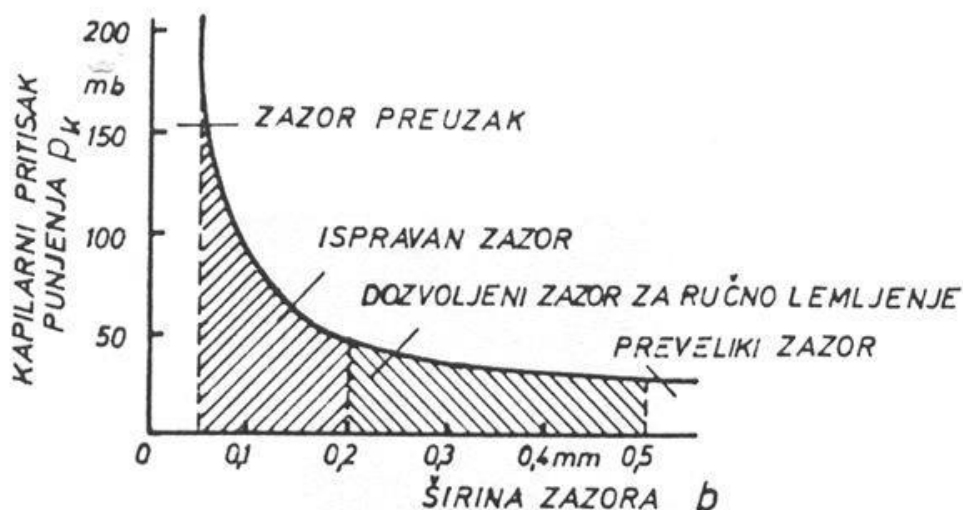
Zalemljeni spoj nije homogeno tijelo. To je heterogena površina koja se sastoji od različitih faza sa različitim fizikalnim i kemijskim svojstvima. U najjednostavnijem slučaju sastoji se od dijelova načinjenih od osnovnog materijala i dodatnog materijala. Također potrebno je razmotriti i spajanje različitih materijala. [1]

Mala zračnost između dijelova koristi se zbog činjenice da manja zračnost omogućuje lakšu distribuciju dodatnog materijala kroz spoj uslijed kapilarosti i manja je opasnost od stvaranja praznina i šupljina uslijed skupljanja kako se dodatni materijal skrućuje. Optimalni spojevi su oni kod kojih je nakvašena cijela površina spoja i popunjena dodatnim materijalom. Preferiraju se zračnosti od 0,075 do 0,150 milimetara za optimalnu čvrstoću ali su dozvoljene i varijacije u specifičnim slučajevima. Često je potrebno napraviti uzorke dijelova i testirati spojeve kako bi se osigurala njihova mogućnost izvođenja. Slika 16 prikazuje sa lijeve strane što će se dogoditi ukoliko je zračnost na spoju prevelika dok desna strana pokazuje pravilno projektiranu zračnost. Vidljivo je kako je kapilarnost puno slabija kod prevelike zračnosti. [1]



Slika 16: Prikaz kapilarnog djelovanja u ovisnosti o veličini zračnosti [6]

Slika 17 prikazuje ovisnost kapilarnog pritiska punjenja u ovisnosti o širini zračnosti. Iz dijagrama se može također zaključiti kako povećanjem iste opada efekt kapilarosti.



Slika 17: Kapilarni pritisak punjenja u ovisnosti o širini zračnosti [6]

Viskoznost, površinska napetost i specifična gravitacija dodatnog materijala nisu jedini faktori koji određuju sposobnost popunjavanja zračnosti kod bilo kojeg dodatnog materijala. Čvrstoća spoja raste kako se smanjuje razmak između dijelova. Ostali faktori koji utječu na optimalni razmak između dijelova su duljina spoja, temperatura lemljenja i metalurške reakcije između osnovnog i dodatnog materijala. [1]

Važno je zapamtiti da se sklop širi tijekom zagrijavanja i da se razmak između dijelova može proširiti ili zatvoriti do trenutka kada se dodatni materijal otopi i kada počne teći. Poželjno je konstruirati spoj kako bi se skrućeni dodatni materijal izložio tlačnim umjesto vlačnih naprezanja. To je puno važnije kod tvrdog u odnosu na meko lemljenje zato što su temperature kod tvrdog lemljenja više što povisuje ukupnu toplinsku ekspanziju. Kod cilindričnih spojeva dijelovi sa većim koeficijentom toplinske ekspanzije trebali bi biti smješteni sa vanjske strane kad god je to moguće. [1]

Zračnost spojeva jedan je od najznačajnijih faktora prilikom tvrdog lemljenja u vakuumu. Zračnosti spoja nisu iste tijekom svih faza lemljenja. Jedna vrijednost bit će prije lemljenja, neka druga tijekom samog procesa lemljenja i neka treća nakon procesa lemljenja, pogotovo ukoliko je bilo značajne interakcije između osnovnog i dodatnog materijala. Kako bi se spriječila zabuna, opća praksa je specificirati zračnost spoja pri sobnoj temperaturi prije procesa lemljenja. [1]

11. Konstrukcija spoja

Zato što se lemljenje oslanja na kapilarnu privlačnost, konstrukcija spoja mora omogućiti neometanu i neprekinutu putanju kako bi talilo, ukoliko se koristi izašlo iz spoja i kako bi se omogućio ulazak dodatnog materijala u spoj. U slučajevima kada se dodatni materijal dodaje u spoj rukom svaki pristup spoju mora biti vidljiv i dostupan. [1]

Neki od važnih faktora koji utječu na konstrukciju spoja su zahtijevana čvrstoća i korozijska otpornost, potrebna električna i toplinska provodljivost, materijali koji se spajaju, apliciranje dodatnog materijala i potreba za inspekcijom spojeva nakon spajanja. [1]

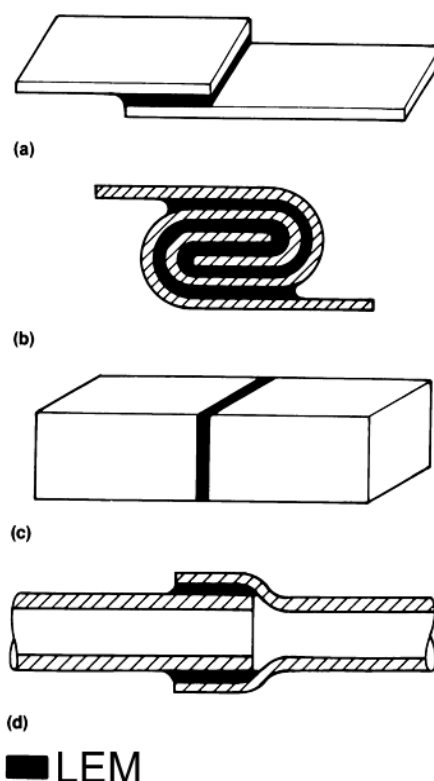
Potrebno je uzeti u obzir i duktilnost osnovnog materijala, distribuciju naprezanja u spoju i relativna gibanja površina tijekom spajanja, što može dovesti do distorzije dimenzija dijelova koji se spajaju. [1]

Spoj mora biti pripremljen na način da se ispune zahtjevi gotovog sklopa kao i da se omogući primjena talila i dodatnog materijala. Spoj mora zadržati pravilan razmak tijekom zagrijavanja i nakon skrućivanja dodatnog materijala. Za fiksiranje dijelova mogu se koristiti posebne naprave za fiksiranje ili se dijelovi mogu međusobno mehanički spojiti (krimpanje, prešanje, presavinuti spoj . . .). [1]

Izbor spoja za specifičnu primjenu primarno će ovisiti o eksploatacijskim uvjetima sklopa. Također može ovisiti i o metodi zagrijavanja, tehnikama izrade koje su se koristile prije lemljenja, broju dijelova koji se leme i metodi kojom se dodaje dodatni materijal. Dodatni materijali općenito imaju nižu čvrstoću u usporedbi sa metalima koje spajaju. Iz tog razloga spoj mora biti napravljen na način da se izbjegne ovisnost o čvrstoći dodatnog materijala. Potrebna čvrstoća može biti ostvarena oblikovanjem dijelova koji se spajaju na način da međusobno zakvače jedan drugoga što zahtijeva od dodatnog materijala da samo poveže, zabrtvi i ukruti spoj. [1]

Slika 18 prikazuje najčešće vrste spojeva koji se obično koriste kod lemljenja: preklopni (a), presavinuti (b), sučeljeni (c) i preklopni spoj cijevi (d). Iako postoji mnogo vrsta spojeva, izbor vrste spoja nije kompliciran kako se to može činiti, budući da su preklopni i sučeljeni spojevi dvije najčešće korištene vrste spojeva. Sve ostale vrste su samo modifikacije ovih dvaju.

Preklopni i sučeljeni spoj obično se koriste kod lemljenja ploča dok se preklopni spojevi primjenjuju i za spajanje cijevi. Preklopni spoj trebalo bi koristiti gdje god je to moguće zato što nudi najbolju mogućnost ostvarenja spoja sa najvišom čvrstoćom. Trebalo bi ga koristiti kad god je potrebno brtvljenje spoja dok bi sučeljeni spoj trebalo bi izbjegavati kad god je to moguće. [1]

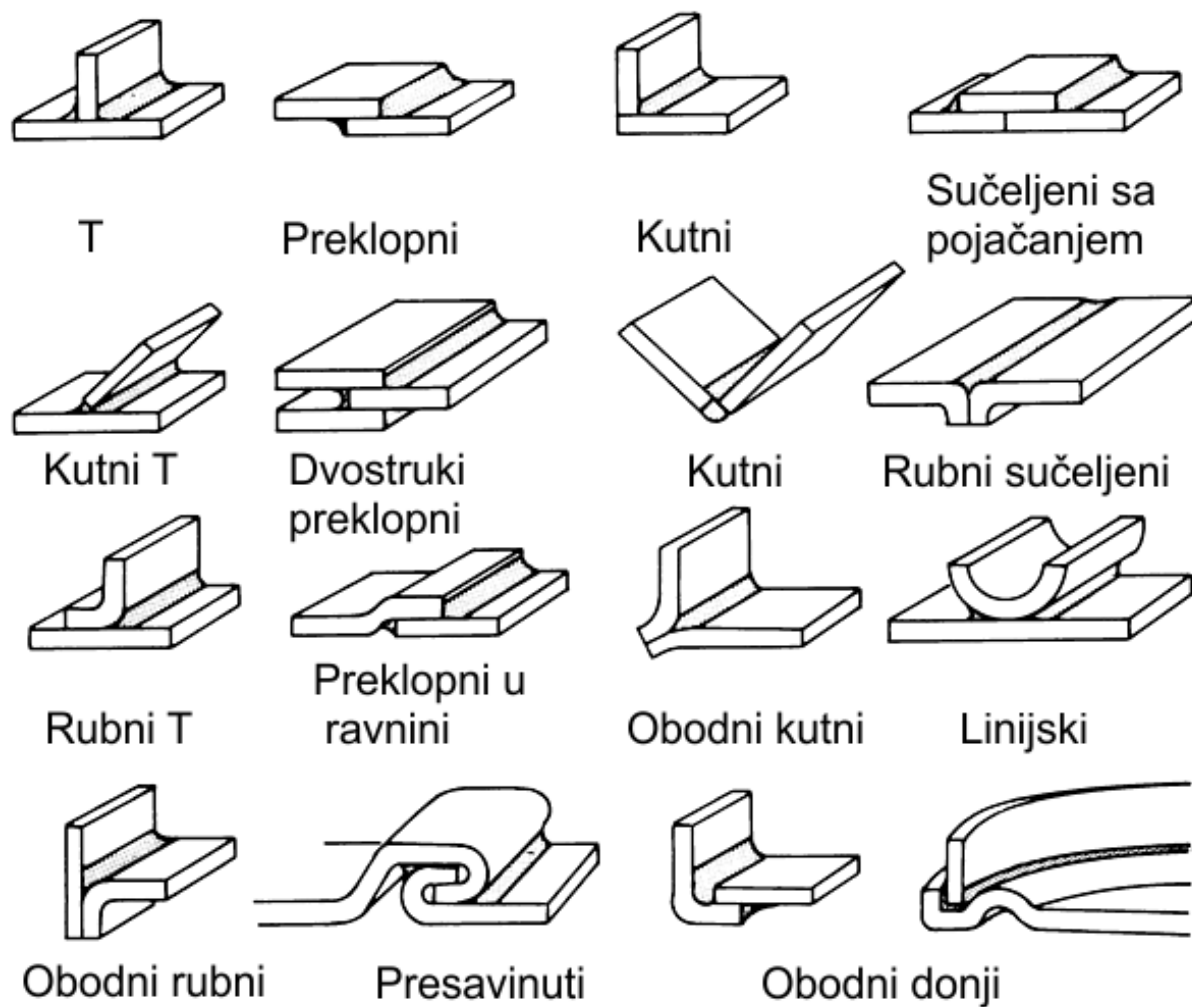


Slika 18: Prikaz najčešće korištenih spojeva prilikom lemljenja [1]

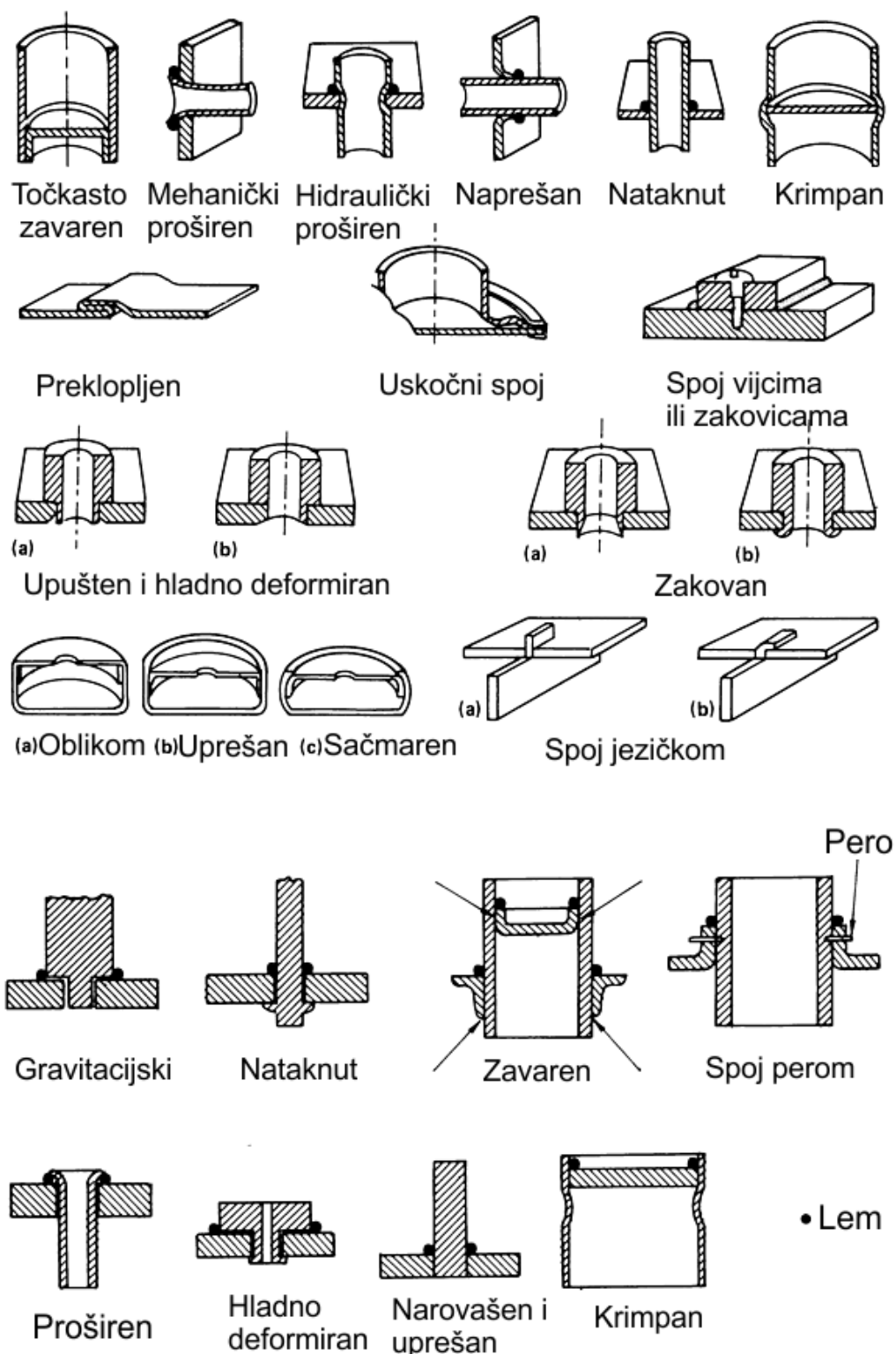
Važan faktor kod pripreme spoja je način na koji će se dodatni materijal dodavati u spoj. Konstruktor mora razmotriti broj spojeva po sklopu i broj sklopova koji se proizvodi. Za ograničenu proizvodnju koja koristi ručne tehnike lemljenja dodatni materijal može se dodavati bez većih problema na samo lice spoja. Za veliku proizvodnju mnogo sklopova koji se sastoje od nekoliko spojeva automatizirani procesi mogu biti od velike prednosti. U tom slučaju priprema spojeva mora biti takva da je prikladna za automatsko dodavanje talila, dodatnog materijala i čišćenje. [1]

Na izbor vrste spoja utječe konfiguracija dijelova, kao i čvrstoća spoja i ostali zahtjevi poput električne vodljivosti, nepropusnosti i vizualnog izgleda. Na izbor vrste spoja također utječu i tehnike proizvodnje, količina proizvedenih dijelova i metode dobave dodatnog materijala. Preklopni spojevi preferiraju se za tvrdo lemljenje, pogotovo kada je važno da spojevi budu jaki kao i najslabiji član sklopa. Za maksimalnu čvrstoću, duljina preklopa trebala bi biti 3 do 4 puta veća od debljine tanjeg člana. [1]

Slika 29 prikazuje neke od ostalih korištenih spojeva dok slika 20 prikazuje oblikovanje spojeva na način da se dijelovi drže zajedno spojem oblikom ili silom tj. da nije potreban neki sklop ili naprava da ih drži međusobno pozicioniranima tokom procesa lemljenja.



Slika 19: Spojevi korišteni prilikom lemljenja [18]



Slika 20: Samonosivi i samo pozicionirajući spojevi korišteni prilikom lemljenja [18]

12. Proračun nosivosti spojeva

Lemljenjem je moguće ostvariti nosive spojeve ili se može raditi samo o samo o postupku spajanja (pričvršćivanja) materijala.

Kada je riječ o nosivim spojevima, čvrstoća lemljenog spoja ovisi o više faktora. Prije svega to je pravilan izbor dodatnog materijala u odnosu na materijale koji se spajaju, odnosno ostvarivanje dobre difuzije dodatnog materijala sa osnovnim materijalom. Pogonska temperatura kao i način opterećenja uvelike utječu na čvrstoću spoja, kao i debljina spoja nakon spajanja (ne bi trebala biti veća od 0,02 mm, izuzetno do 0,5 mm), hrapavost površina i smjer rasprostiranja tragova površinske obrade. Nosivost zalemljenih spojeva ovisi i o vremenu eksploatacije. U tablici 12.1 prikazane su neke mehaničke osobine važnijih dodatnih materijala tj. leмова. Valja napomenuti kako se vrijednosti odnose na veličinu raspora od 0,1mm i kako se za odnos vlačne čvrstoće i čvrstoće na smik može uzeti grubi odnos $\sigma_L = (\text{od } 1,5 \text{ do } 2,5)\tau_L$. [19]

Tablica.4: Čvrstoće nekih dodatnih materijala za tvrdo lemljenje [19]

Vrsta lema (DIN8525)	Radna temperatura, °C	Vlačna čvrstoća dodatnog materijala, σ_{LB}					Čvrstoća na smik, τ_{LB}	
		S235	E295	E335	X10Cr Ni18	CuZn37	S235	E335
L-Ag40Cd	610	410	540	640	520	230	170	250
L-Ab30Cd	680	380	570	680	510	250	200	240
L-Ag44	730	390	580	520	530	280	205	280
L-Ag20Cd	750	370	420	440	500	260	170	260
L-Ag12	830	370	460	460	440	310	170	200

Proračun nosivosti temelji se na površini spajanja A_L (površini lemljenog spoja) i opterećenju tj. silom F . Opterećenje sučeljenih spojeva koji su prikazani na slici 18c) računa se kako je prikazano jednadžbom 6:

- normalno naprezanje

$$\sigma_L = \frac{K_A F}{A_L} \leq \sigma_{dop}, [\text{N/mm}^2] \quad \sigma_{dop} = \frac{\sigma_{LB}}{S} \quad (6)$$

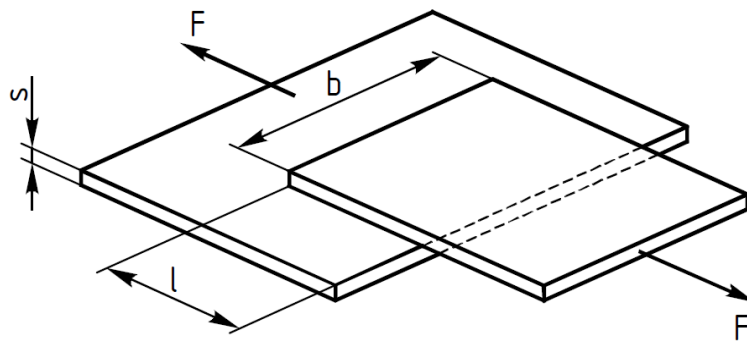
gdje je σ_L normalno naprezanje u dodatnom materijalu u spoju, K_A faktor udara, F sila koja opterećuje spoj [N], A_L površina zalemljenog spoja [mm²], σ_{LB} vlačna čvrstoća dodatnog materijala [N/mm²] i S faktor sigurnosti.

Kako se većina zalemljenih spojeva izvodi kao preklopni spoj prikazan na slici 18a) u tom slučaju proračun se provodi sa srednjim tangencijalnim naprezanjima kako je prikazano jednačbom 7:

- srednje tangencijalno naprezanje

$$\tau_L = \frac{K_A F}{A_L} \leq \tau_{dop}, [N/mm^2] \quad \tau_{Ldop} = \frac{\tau_{LB}}{S} \quad (7)$$

gdje je τ_L srednje tangencijalno naprezanje u spoju i τ_{LB} čvrstoća dodatnog materijala na odrez [N/mm^2]. Faktor sigurnosti S se zbog velikih rasipanja mehaničkih svojstava dodatnog materijala odabire dosta visok i on se kreće u granicama od 2 do 4.



Slika 21: Parametri za proračun preklopnog spoja [20]

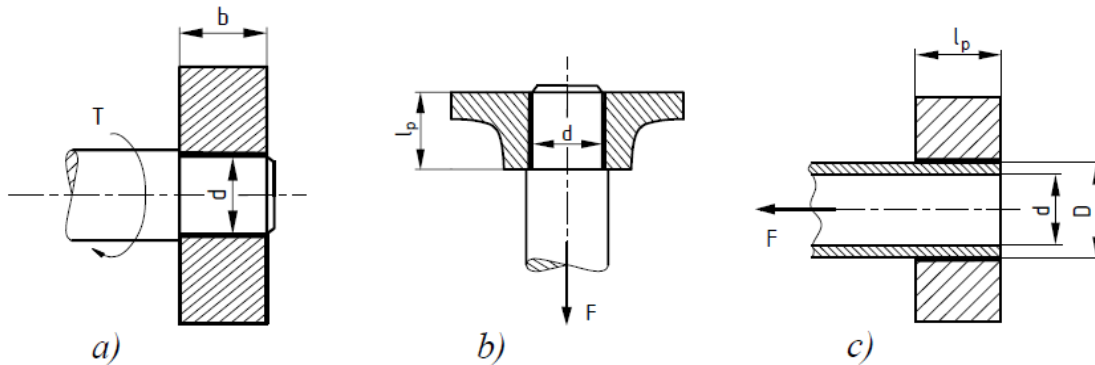
Kod preklopnog spoja limova jednakih debljina kako je prikazano na slici 21, dužina preklopa određuje se na temelju jednačbe 8:

$$l = s \frac{K_A R_m}{\tau_{LB}} = s \frac{K_A \sigma_{dopM}}{\tau_{Ldop}}, [mm] \quad (8)$$

gdje je l potrebna dužina preklopa [mm], s debljina osnovnog materijala [mm], R_m vlačna čvrstoća slabijeg osnovnog materijala u spoju [N/mm^2], σ_{dopM} dopušteno naprezanje slabijeg osnovnog materijala u spoju [N/mm^2] i τ_{Ldop} dopušteno naprezanje dodatnog materijala [N/mm^2]. Navedena formula vrijedi kako je navedeno uz pretpostavku da se zadržava nosivost slabijeg osnovnog materijala u spoju ukoliko se radi o spajanju dva različita materijala. Ukoliko se spoj sastoji od istog osnovnog materijala u formulu se uvrštavaju njegovi parametri. [19]

Preporuka je da se dužina preklopa izvodi sa omjerom l/s od 4 do 6 budući da je teško postići jednolik raspored lema po cijeloj površini spoja.

U slučaju većih debljina limova, do izražaja dolazi i savojnog opterećenja dodatnog materijala u spoju pa je potrebno provesti proračun sa kombiniranim opterećenjem na savijanje i smik. [19]



Slika 22: Prikaz različitih vrsta opterećenja na spoju [19]

U slučaju kada je spoj opterećen momentom na torziju kao što je prikazano na slici 22a) naprezanje u spoju se računa pomoću jednadžbe 9:

$$\tau_L = \frac{2T/d}{d\pi b} = \frac{2T}{d^2\pi b}, [\text{N/mm}^2] \leq \tau_{Ldop}; \quad \tau_{Ldop} = \frac{\tau_{LB}}{S} \quad (9)$$

gdje je τ_L smično naprezanje u spoju [N/mm^2], T okretni moment koji opterećuje spoj [N], d promjer spoja [mm], b širina spoja [mm]

U slučaju da je spoj opterećen aksijalnom silom kao što je prikazano na slici 22b), vrijedi jednadžba 10:

$$d\pi l_p \tau_{LB} = d \pi R_m / 4 \quad (10)$$

gdje je l_p duljina spoja u preklopu [mm]. Jednadžba 13.4 može se preformulirati kako bi se dobila jednadžba 11 za izračun duljina preklopa:

$$l_p = \frac{K_A R_m}{\tau_{LB}} \frac{d}{4}, [\text{mm}] \quad (11)$$

Ukoliko je riječ o spoju koji se sastoji od šuplje cijevi kako je prikazano na slici 22c) jednadžba 12 prelazi u sljedeći oblik:

$$l_p = \frac{K_A R_m}{\tau_{LB}} \frac{D^2 - d^2}{4d}, [\text{mm}] \quad (22)$$

gdje je D vanjski promjer cijevi [mm] a d unutarnji promjer cijevi [mm]. [20]

13. Nerazorne metode ispitivanja zalemljenog spoja

Nerazorne metode ispitivanja ključne su za provjeru zalemljenih spojeva kada nije moguće provesti destruktivna ispitivanja tj. kada se ne smije razoriti zalemljeni spoj ili sklop koji se ispituje. Većinom metoda nerazornih ispitivanja nije moguće dobiti informacije o mehaničkim svojstvima spojeva poput čvrstoće, tvrdoće itd.. Međutim određeni zaključci i očekivanja vezana za navedena svojstva mogu se izvesti na temelju rezultata ispitivanja. Uz pomoć nerazornih metoda na zalemljenim spojevima mogu se uočavati različite nesavršenosti koje mogu prouzrokovati smanjenje kvalitete i mehaničkih svojstava spoja ili zalemljenog sklopa. Većina zalemljenih spojeva konstruirana je u preklopnom spoju. Iz tog razloga kao i kapilarne prirode spoja većina nesavršenosti nalazit će se unutar zone spoja u smjeru koji je paralelan sa ravninom spoja. Ostale nesavršenosti prouzrokovane su naprezanjima u dodatnom ili osnovnom materijalu ili su već prisutne prije samog postupka lemljenja. Prilikom nerazornih metoda ispitivanja najčešće se promatra samo oblikovanje spoja tj. kako je dodatni materijal tekao unutar zone spoja, kakvo je bilo kvašenje, te vizualni izgled spoja kao i poroznost, te propuštanje istog. Uz pomoć nerazornih metoda koje ispitivanjem mogu prodrijeti u unutrašnjost spoja, moguća je i detekcija različitih nečistoća, pora, uključaka i pukotina unutar spoja. [20, 21]

Nerazorne metode ispitivanja koje se primjenjuju na zalemljenim spojevima i konstrukcijama definirane su sa normom BS EN 12799:2000 koja je norma za nerazorno ispitivanje zalemljenih spojeva. Navedene metode mogu biti [21]:

- vizualna metoda
- ultrazvučna metoda
- radiografska metoda
- penetrantska metoda
- metoda ispitivanja propusnosti
- metoda ispitivanja opterećenjem
- termografska metoda.

Zalemljeni spojevi na koje se primjenjuju ove metode ispitivanja mogu biti u obliku ispitnih uzoraka proizvedenih za prikupljanje podataka o konstrukciji spoja. Mogu biti proizvedeni kao dio procedure ispitivanja postupka lemljenja ili kao dijelovi zalemljenog sklopa. [21]

13.1. Vizualna metoda

Jednostavna vizualna metoda ispitivanja najosnovnija je i najčešće primjenjivana metoda nerazornog ispitivanja. Ispitivanje se odnosi na kvalitetu spoja i izgled spoja te ne uključuje provjeru dimenzija. Moguće ga je provoditi prije, za vrijeme i nakon postupka lemljenja. Tijekom postupka konstruiranja sklopa potrebno je predvidjeti adekvatan pristup spojevima da se omogući vizualni pregled. Kada je spoj lako dostupan i može se pregledavati bez uporabe pomagala tada se tehnika ispitivanja naziva direktnom. U navedenom slučaju moguća je primjena širokokutnog povećala kako bi se smanjilo naprezanje oka. Ukoliko je pristup spoju otežan ili se ne može direktno vidjeti tada se tehnika ispitivanja naziva indirektna. Kod navedene tehnike primjenjuje se različita oprema koja omogućuje indirektnu vidljivost područja koje se pregledava poput zrcala i endoskopa različitih vrsta poput boroskopa, fibroskopa ili videoskopa. Iz navedenih razloga prije samoga ispitivanja potrebno je definirati opseg pregleda za svaki radni komad budući da velika većina radnih komada ima određen udio spojeva kojima je teško pristupiti ili se mogu pregledati primjenom posebnih tehnika. [20, 21]

Područje koje se pregledava mora biti adekvatno osvijetljeno kako bi se lakše uočile indikacije i kako bi se smanjilo naprezanje oka. Prilikom pregleda ukoliko je potrebno mjeriti dimenzije indikacija potrebno je koristiti različita mjerila i šablone s ciljem kompariranja dimenzija indikacija sa nekom poznatom dimenzijom. [20, 21]

Uz pomoć vizualne metode ispitivanja moguće je uočiti sljedeće nesavršenosti [21]:

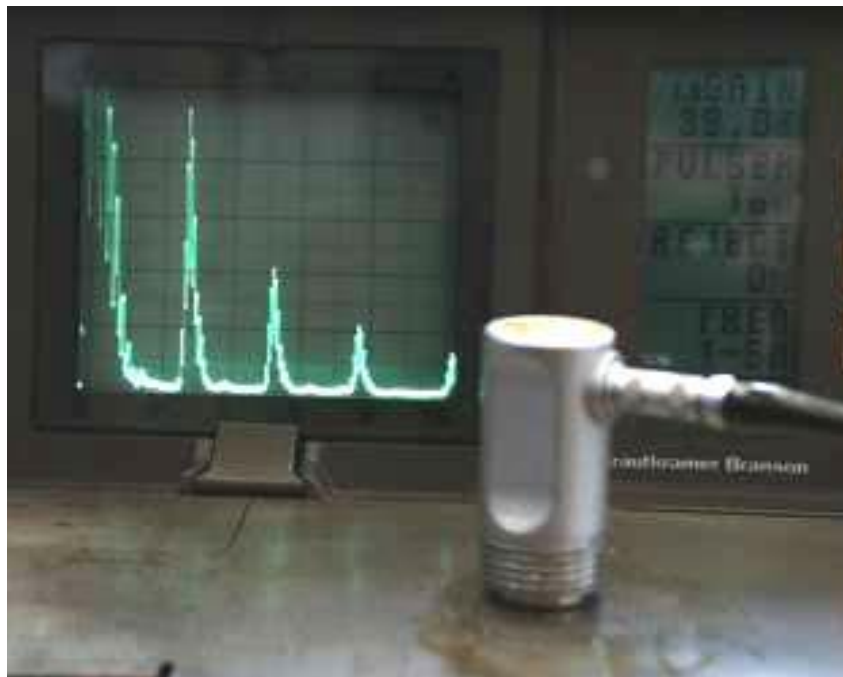
- Zaostalo talilo na površini i ostatak talila nakon postupka budući da se može specificirati opseg njegovog uklanjanja nakon samog postupka ili kako bi se omogućio pregled spoja.
- Kontinuitet spoja. Potrebno je naglasiti da li je kontinuirani ili diskontinuirani (isprekidani) spoj prihvatljiv i u kojoj mjeri. Kada je diskontinuirani spoj prihvatljiv u postupku lemljenja, potrebno je detaljno opisati uvjete pri kojima on spoj zadovoljava.
- Usahline u spoju koje mogu nastati uslijed pripreme spoja tj. zračnosti spoja na gornjoj granici procesa ili uslijed premale količine dodatnog materijala.
- Višak dodatnog materijala. Kada je potrebno da dodatni materijal ne prijeđe na površinu uz zalemljeni spoj to područje mora biti naznačeno na sklopnom crtežu. To je nužno kao vodilja za primjenu tvari koje sprječavaju širenje rastaljenog dodatnog materijala na neželjena područja tijekom pripreme prije lemljenja i za potrebe ispitivanja.

- Erozija površine. Kod nekih procesa poput lemljenja aluminija može doći do erozije osnovnog materijala. Ukoliko se ona dozvoljava potrebno je naznačiti stupanj erozije koji je prihvatljiv.
- Vizualni izgled spoja. Ukoliko postoje određeni zahtjevi za vizualnim izgledom spoja potrebno ih je naznačiti prije samog ispitivanja. To može utjecati na odluke vezane za detalje i troškove samog procesa lemljenja.
- Pore i pukotine otvorene prema površini koje su veće od minimalno značajne dimenzije nesavršenosti koja se najčešće uzima 0,5mm za vizualnu metodu ispitivanja. Nesavršenosti koje su manje od minimalne značajne dimenzije zanemaruju se ili se, ukoliko integritet spoja to zahtjeva, primjenjuju neke druge metode ispitivanja.

Osoba koja provodi ispitivanja vizualnom tehnikom mora biti upoznata sa tehnologijom lemljenja kao i sa očekivanim nesavršenostima spoja te dogovorenim parametrima ispitivanja. Osoba također mora testirati vid u skladu sa normom BS EN 473:2008 koja je norma za kvalificiranje i certificiranje osoblja za nerazorna ispitivanja. [21]

13.2. Ultrazvučna metoda

Ultrazvučna metoda ispitivanja, definirana normom EN 583-1:1998, koristi zvučne valove visokih frekvencija prilikom ispitivanja. Izvor valova najčešće je piezoelektrična sonda koja se spaja na instrument i odašilje valove kroz materijal. Slika 23 prikazuje uređaj za ultrazvučno ispitivanje i sondu koja je prislonjena na materijal. Ispitivanje se najčešće provodi primjenom direktne tehnike prilikom čega je ultrazvučni val okomit na ravninu spoja. Val prolazi kroz materijal te se odbija od stražnje površine materijala i nesavršenosti u spoju. Odbijeni val hvata prijemnik ugrađen u sondu nakon čega se energija vala pretvara u električnu veličinu i ide na daljnju obradu kako bi se signal mogao prikazati na odgovarajućem uređaju. U slučaju dobrog spoja relativno malo energije odbija se od linije spoja te ukoliko je geometrija spoja dobra dobije se velik odziv refleksije od stražnje površine. Na mjestu gdje spoj nije zadovoljavajući velik udio signala reflektira se od linije spoja što je praćeno smanjenjem signala refleksije od stražnje površine. Kada konfiguracija spoja ne dozvoljava primjenu normalne sonde mogu se koristiti dvije kutne sonde koje rade kao odvojeni odašiljač i prijemnik vala. [20, 21]



Slika 23: Oprema koje se koristi prilikom ultrazvučne metode ispitivanja [20]

Spoj između sonde i površine mora biti ostvaren ili uranjanjem spoja u tekućinu ili primjenom paste ili sličnog medija prikladnog za ovu namjenu. Medij mora biti kompatibilan sa materijalom koji se ispituje i ne smije utjecati na svojstvo spoja ukoliko ga se ne ukloni nakon završetka ispitivanja. Ukoliko je moguće sonda bi trebala biti oblikovana da prati konture objekta koji se ispituje. [20, 21]

Izbor sonde, definiran normom EN 583-1:1998, ovisi o više faktora prvenstveno o konfiguraciji spoja, debljini materijala i njegovim svojstvima prigušivanja kao i rezoluciji potrebnoj prilikom ispitivanja koja će ovisiti o minimalnoj veličini nesavršenosti koja se želi detektirati. Viša rezolucija postiže se višim frekvencijama, manjim sondama i fokusiranjem zrake. Frekvencije valova obično se kreću u rasponu od 1 do 10 MHz ali moguće je koristiti i više frekvencije u posebne svrhe primjerice kod tankih materijala. [20]

Stanje površine koja se ispituje mora biti takvo da se omogući zadovoljavajući spoj između površine i sonde. Hrapavost površina ne smije preći $6,3\mu\text{m}$. Ukoliko je potrebno površina koja se ispituje može se pripremiti određenim metodama strojne obrade kako bi se to osiguralo. [20]

Prije samoga ispitivanja kalibriranje i podešavanje osjetljivosti skeniranja, definirano normom EN 583-2:1997, mora se odrediti na odgovarajućem etalonu koji je sličan spoju koji se ispituje i sadrži ili prirodne nesavršenosti dogovorene veličine i položaja ili simulirane nesavršenosti proizvedene strojnom obradom. [21]

Prilikom ručnog ispitivanja brzina skeniranja mora uzeti u obzir mogućnost operatera da prepozna i snimi signalne nesavršenosti. Najveća dozvoljena brzina će se smanjiti kada se smanji veličina nesavršenosti koju je potrebno detektirati. [21]

Najčešće nesavršenosti koje se mogu otkriti ultrazvukom su [21]:

- nedovoljno tečenje unutar kapilarnog procjepa
- pore ili uključci talila
- uzdužne pukotine
- sitne pore
- nedovoljno kvašenje površina
- poprečne pukotine.

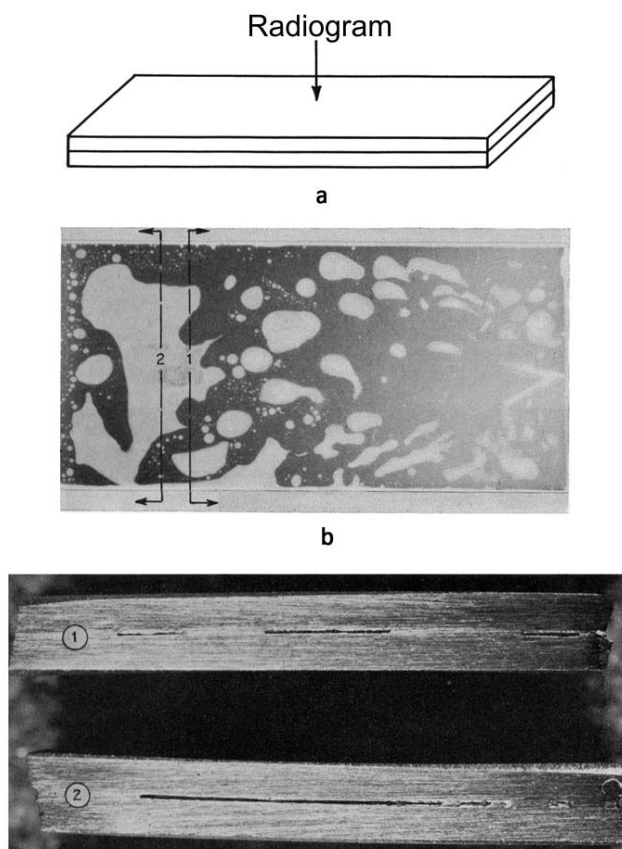
Kao i kod vizualne metode procjena i detekcija indikacija uvelike ovisi o osposobljenosti i iskustvu operatera te on mora biti upoznat sa tehnologijom lemljenja kao i sa očekivanim nesavršenostima spoja, te dogovorenim parametrima ispitivanja. [21]

13.3. Radiografska metoda

Radiografska metoda ispitivanja, definirana normom HRN EN ISO 5579:2014, metoda je nedestruktivnog ispitivanja koja koristi penetrirajuće radioaktivno zračenje za detekciju nesavršenosti u spojevima i omogućava identifikaciju kritičnih unutarnjih nesavršenosti. Kao izvor zračenja može se koristiti rendgen uređaj ili aktivni izotopi. Intenzitet prodiranja zračenja modificira se prolaskom kroz materijal i nesavršenosti u istom. Kod metode filma zrake utječu na fotografsku emulziju na filmu, koji se smješta ispod spoja, i prisutnost diskontinuiteta ili nepovezanih dijelova bit će jasno prikazan na razvijenom filmu. U slučaju ispitivanja zalemljenih spojeva ovom tehnikom na osjetljivost utječe sastav dodatnog materijala. Ukoliko je koeficijent apsorpcije dodatnog materijala malo viši od osnovnog materijala primjena metode za ispitivanje malih kapilarnih spojeva značajno je otežana. [20, 21]

Ukoliko dodatni materijal posjeduje različitu apsorpciju u odnosu na osnovni materijal radiografija se može koristiti za pregled spojeva ovisno o relativnoj debljini dodatnog i osnovnog materijala. Razvijene su i radiografske metode bez filma. Međutim, potrebno ih je pažljivo koristiti zbog otežanosti postizanja ponovljive osjetljivosti. [20, 21]

Slika 24 prikazuje razvijeni film tj. radiogram koji prikazuje preklopljeni spoj dviju ploča koje su zalemljene. Na radiogramu se jasno vide zone u kojima nije došlo do ostvarivanja spoja (svijetle mrlje na radiogramu) u odnosu na zone gdje je ostvaren spoj (tamno područje) što je dodatno prikazano prerezom spoja.



Slika 24: Radiogram preklopljenog zalemljenog spoja [22]

Primjenom ove metode moguće je detektirati iste nesavršenosti koje su navedene u ultrazvučnoj metodi uz opasku da radiografskom metodom nije moguće detektirati na kojoj se dubini nalazi nesavršenost već samo njezin položaj u odnosu na dužinu i širinu materijala. [21]

13.4. Penetrantska metoda

Ispitivanje penetrantima, definirano normom HRN EN ISO 3452-1:2013, može se koristiti kako bi se locirale nesavršenosti koje izbijaju na površinu poput pora, nedovoljnog punjenja spoja dodatnim materijalom i nedostatka kvašenja površine. Penetrantska metoda istakne nesavršenosti u većem opsegu u odnosu na vizualnu metodu i iz tog razloga može se primjenjivati u proizvodnji kako bi se poboljšala pouzdanost ispitivanja. [21]

Ispitivanje se provodi na čistoj i suhoj površini. Ostatak talila i komponenata za maskiranje u blizini spoja potrebno je u potpunosti ukloniti. Zahtjevi za pripremom površine spoja trebaju biti uspostavljeni prije ispitivanja. Ukoliko je potrebno pripremiti površinu potrebno je osigurati da proces pripreme ne maskira dublje nesavršenosti tj. da čestice nastale prilikom strojne obrade ne prodru u pukotine i popune ih. [20, 21]

Prikladan penetrant nanese se na ispitnu površinu te on prodire u nesavršenosti koje su otvorene prema površini. Nakon isteka vremena penetracije višak penetranta uklanja se sa površine prikladnim metodama tj. odgovarajućim odstranjivačima. Potom se nanese razvijač. Penetrant koji je zaostao u nesavršenostima oboji razvijač što daje jasnu indikaciju istih. Penetranti mogu biti fluorescentni ili obojani ovisno o uvjetima promatranja. Penetrant, razvijač i sredstvo za uklanjanje kupuju se zajedno kao set i nije preporučljivo miješati sredstva različitih proizvođača. Slike 25 i 26 prikazuju indikacije pukotina korištenjem fluorescentnog i obojenog penetranta. [20]



Slika 25: Indikacija pukotine prikazana fluorescentnim penetrantom [20]



Slika 26: Indikacija pukotina prikazana obojenim penetrantom [20]

Valja napomenuti kako može biti teško ili nemoguće ukloniti penetrante pogotovo iz međusobno spojenih pora. Ukoliko je dozvoljeno prelemljivanje sklopova ova metoda ispitivanja smije se primjenjivati isključivo ukoliko je moguće u potpunosti ukloniti penetrant budući da prisutnost penetranta može utjecati na tečenje dodatnog materijala ukoliko se spoj nakon ispitivanja ide ponovno lemiti tj. popravljati. [21]

13.5. Metoda ispitivanja propusnosti

Metoda ispitivanja propusnosti, definirana normom HRN EN 1779:1999/A1:2008, može se koristiti pored detekcija pukotina i za kvantificiranje ili mjerenje brzine istjecanja tj. određivanje ukupne brzine istjecanja koja je izražena mjernom jedinicom paskal kubni metar po sekundi [$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$] tj. propusnosti na sklopu ili spoju. Ispitivanje se može provoditi na dva načina [21]:

- detekcija istjecanja iz objekta u okolinu kroz spoj (tlačno ispitivanje)
- detekcija istjecanja iz okoline u objekt kroz spoj (vakumsko ispitivanje).

Ukoliko je potrebno pored detekcije pukotina ispitati i brzinu istjecanja kroz spoj uz višu razinu osjetljivosti to se izvodi detekcijom istjecanja iz okoline u objekt koji se ispituje.

Korištenjem helija kao ispitnog medija i masenog spektrometra za detekciju istjecanja može se detektirati istjecanje od najmanje 10^{-10} Pa·m³/s i to gore navedenom metodom. Kod ispitivanja mjehurićima, spoj se stavi pod tlak te se uroni u fluid ili se prekrije odgovarajućim sredstvom poput sapunice, ima najmanju mogućnost detekcije istjecanja od minimalno 10^{-1} Pa·m³/s. Ispitivanje na istjecanje može se provoditi tijekom različitih faza proizvodnje. U slučaju ispitivanja vakuumom potrebno je ukloniti sve zapaljive spojeve iz okoline prije ispitivanja. Porozni spojevi i materijali mogu dati lažne indikacije curenja dok vlaga u zoni spoja može maskirati mala curenja. Slika 27 prikazuje ispitivanje postrojenja uz pomoć helija i masenog spektrometra. [21]



Slika 27: Ispitivanje istjecanja helijem [23]

Objekti koji se ispituju moraju izdržati razliku tlakova te se ne smiju deformirati ili prouzrokovati ozljede radnika i štetu. Oni mogu sadržavati i opasne materijale te je potrebno uzeti u obzir mjere opreza prilikom ispitivanja da se spriječi istjecanje istih. Također je potrebno uzeti u obzir svojstva ispitnih plinova. Primjerice amonijak je toksičan, zapaljiv plin koji može biti korozivan u prisustvu vlage. Plinovi koji sadrže halogene elemente mogu prouzrokovati štete u višim slojevima atmosfere dok većina plinova poput helija i dušika mogu prouzrokovati gušenje. Iz navedenih razloga potrebno je oprezno rukovati sa plinovima, dok je prilikom korištenja amonijaka isti potrebno apsorbirati i neutralizirati. [21]

13.6. Metoda ispitivanja opterećenjem

Ispitivanje opterećenjem metoda je ispitivanja prilikom koje se spoj optereti većim opterećenjem nego što će ono biti tijekom eksploatacije, ali koje neće prouzrokovati trajne deformacije. Opseg opterećenja mora biti specificiran da uzme u obzir sve relevantne zahtjeve na konstrukciju i norme. U nekim slučajevima reprezentativni uzorci mogu biti izuzeti iz proizvodnje i ispitani ovom metodom dok je za primjenu na kritičnim mjestima moguće ispitati sve spojeve. [21]

Učestalost, metodu i opseg ispitivanja potrebno je ustanoviti prije samog ispitivanja. Opterećenje može biti statičko ili dinamičko te se izvođenje ispitivanja može provoditi na ambijentalnoj ili unaprijed dogovorenoj temperaturi. Ukoliko ne dođe do razaranja spoja i spoj izdrži ispitivanje tada je riječ o nerazornom ispitivanju. Ukoliko pak dođe do razaranja spoja tada je riječ o razornom ispitivanju. [21]

Samo ispitivanje provodi se s ciljem potvrđivanja proračuna konstrukcije, da se provjeri kvaliteta materijala korištenih prilikom spajanja i sposobnost sklopa da izdrži maksimalno naprezanje kojem će biti izložen tijekom eksploatacije. [21]

Ispitivanje će se provesti metodom koja je najprikladnija obliku ispitnog uzorka. Za proizvode koji moraju zadovoljiti određene standarde i norme potrebno je razmotriti zahtjeve istih budući da moraju biti zadovoljeni. Ovisno o metodi opterećivanja moguće je provoditi sljedeća ispitivanja [21]:

- tlačno ili vlačno ispitivanje
- hidrostatsko ispitivanje
- pneumatsko ispitivanje
- centrifugalno ispitivanje
- ispitivanje toplinskim šokovima ili temperaturnim ciklusima
- ostale metode ispitivanja.

Kod vlačnog ispitivanja opterećenje je obično 20% veće nego maksimalno opterećenje tijekom eksploatacije konstrukcije. Tijekom ispitivanja potrebno je provoditi mjerenje dimenzija i promjene istih na ispitnim uzorcima. Opseg mjerenja i metode koje će se primjenjivati tijekom ispitivanja trebaju biti ustanovljene prije samoga ispitivanja. Ispitne uzorke potrebno je vizualno pregledavati tijekom ispitivanja dok se u slučaju hidrostatskog ispitivanja može pratiti eventualna pojava istjecanja na spojevima. [21]

13.7. Termografska metoda

Ispitivanje termografijom uključuje proučavanje raspodjele topline kroz ili unutar samog spoja. Ova metoda može detektirati samo nepovezana područja i relativno je nova metoda koja se pokazala uspješnom prilikom ispitivanja određenih spojeva. Primjenjuje se prilikom ispitivanja zalemljenih spojeva sačastih konstrukcija kada je spoj teško provjeriti ostalim nerazornim metodama. [21]

Ispitni uzorak proučava se neposredno nakon vađenja iz peći za lemljenje ili uklanjanja izvora topline. Promatrana promjena temperature u uzorku zapisuje se automatski ili ručno u ovisnosti o opremi i kriterijima ispitivanja. Uzorci se mogu ispitivati i prilikom hlađenja sa specificirane temperature ili proučavati nakon hlađenja na ujednačenu temperaturu te potom prilikom hlađenja na ambijentalnu temperaturu. Ispitivanje se provodi termografskim kamerama. [21]

Površina ispitnog uzorka mora biti pripremljena na način da se uklone talila, boja, masti, oksidni filmovi i površinske nečistoće bilo kojeg tipa kako ne bi utjecale na promatranje temperaturnog polja iz kojega se interpretiraju rezultati. [21]

Kako bi ova metoda proizvela zadovoljavajuće rezultate ispitivanja ujednačenost ciklusa zagrijavanja mora biti kontrolirana sa dovoljnom preciznošću kako bi se dobio rezultat ispitivanja podoban za analizu. Problemi prilikom primjene termografske metode proizlaze iz činjenice da razlike u stupnju emisije površina mogu prouzročiti zbunjujući kontrast dok utjecaj konvekcije može prouzrokovati lažne indikacije. [21]

Metoda se može primjenjivati u većini slučajeva kada je dostupna samo jedna strana zalemljenog sklopa te se ispitivanje provodi veoma brzo za sklopove sa više spojeva. Vrijeme potrebno za interpretaciju rezultata ispitivanja termografskom metodom usporedivo je sa ostalim nerazornim metodama ispitivanja. [21]

14. Eksperimentalni dio

Cilj eksperimentalnog dijela ovoga rada bio je odrediti utjecaj parametara lemljenja na mehanička svojstva lemljenog spoja. Postupak koji se koristio za spajanje osnovnog materijala je tvrdo lemljenje plamenom (912 prema HRN EN ISO 4063:2012). Kako se u ovome slučaju radilo o ručnom postupku gdje je nešto teže kontrolirati određene parametre poput unosa topline, budući da kontrola istih ovisi i o vještini osobe koja izvodi spoj, za ispitivanje je uzet utjecaj razmaka između osnovnog materijala tj. zračnosti na mehanička svojstva i formiranje spoja.

Nakon postupka spajanja bilo je potrebno odabrati prikladnu metodu nerazornog ispitivanja prema normi BS EN 12799:2000 te ocijeniti prikladnost iste za realne proizvodne uvjete. Kao metoda nerazornog ispitivanja odabrana je vizualna metoda za pregled vanjskih površina dok se unutrašnji pregled spoja izvodio uz pomoć radiografske metode.

Nakon nerazornih ispitivanja, utjecaj zračnosti prilikom pripreme spoja na mehanička svojstva ispitan je mjerenjem prekidne sile na univerzalnoj kraljici.

14.1. Priprema uzoraka i označavanje

Uzorci za eksperimentalno određivanje utjecaja zračnosti na mehanička svojstva spoja izraženi su od različitih materijala kako bi se mogao, pored gore navedene zračnosti, proučiti i utjecaj spajanja različitih materijala u zalemljeni spoj. Za prvi materijal odabran je bakar za opću upotrebu oznake Cu DHP dok je drugi materijal ugljični čelik oznake S235 JRG2.

Uzorci su izrezani na trake širine 25 mm i debljine 3 mm te su se, budući da će se spajati u sučeljeni spoj, rubovi koji će se lemiti poravnali na tračnoj brusilici kako bi se dobila ravna površina i skinuo srh. Nakon toga površina je pripremljena čišćenjem sa alkoholom kako bi se sa iste uklonile masnoće i nečistoće. Slika 28 prikazuje uzorke pripremljene za lemljenje.



Slika 28: Uzorci pripremljeni za lemljenje

Ukupno je pripremljeno 24 uzorka da se napravi 12 sučeljenih spojeva sa po 3 spoja u svakoj skupini. Skupine se razlikuju u zračnosti koja je ostavljena između osnovnog materijala prije lemljenja. Uzorci su označeni brojevanom oznakom gdje prva znamenka označava broj skupine, dok druga označava broj uzorka unutar skupine. Tablica 5 prikazuje grupiranje i označavanje uzoraka.

Tablica 5: Podjela uzoraka prema parametru zračnosti

Oznaka uzorka XY	Zračnost [mm]
1Y	0,4
2Y	0,5
3Y	0,25
4Y	bez zračnosti

14.2. Postupak lemljenja

Kao što je ranije navedeno postupak lemljenja je tvrdo lemljenje plinskim plamenom. Oprema korištena prilikom lemljenja je standardna garnitura za plinsko zavarivanje koja se sastoji od spremnika sa kisikom, spremnika sa gorivim plinom (u ovom slučaju korišten je acetilen), regulatora protoka i plamenikom. Kod lemljenja plamenom potrebno je postaviti omjer kisika i acetilena da plamen nastao izgaranjem bude blago reducirajući kako bi se spriječila oksidacija koja se može javiti kod oksidirajućeg plamena.

Kao podloga, za lemljenje prvo je korištena metalna ploča koja se pokazala neadekvatnom budući da je dolazilo do naljepljivanja tj. zalemljivanja iste za uzorke te je zamijenjena šamotnom ciglom na koju dodatni materijal ne prianja.

Zračnost spoja osigurana primjenom mjernih listića koji su se umetali u razmak između osnovnih materijala prije lemljenja. Nakon umetanja listića i osiguravanja razmaka uzorci su se konačno osigurali od gibanja pritezanjem stegama. Slika 28 prikazuje pripremljeni spoj netom prije lemljenja. U ovome slučaju riječ je o uzorku iz 4. skupine koji su se spajali bez zračnosti.



Slika 29: Priprema spoja za postupak lemljenje

Budući da je riječ o spajanju različitih metala kao dodatni materijal uzet je materijal od tvrtke Castolin oznake 1802 čiji su podaci dani u tablici 6.

Kao talilo odabrano je u ovisnosti o osnovnom i dodatnom materijalu talilo od istog proizvođača oznake Castolin Flux 1802 Atmosin čiji su tehnički podaci prikazani u tablici 7. Kako talilo dolazi u obliku praha potrebno ga je razrijediti sa vodom kako bi se napravila pasta koja se nanosi na materijal koji se spaja i unutar zone spoja.

Tablica 6: Tehnički podaci dodatnog materijala [24]

Naziv	Castolin 1802-srebrni lem sa kadmijem za željezne, bakrene materijale na bazi nikla i tvrde metale	
Osobine	Srebrni lem udjelom kadmija od 40% sa niskom radnom temperaturom. Izrazito dobre osobine taljenja i kapilarnost. Žilavi spojevi sa visokom čvrstoćom. Za radne temperature do 150°C	
Tehnički podaci	DIN 8513:	L-Ag40Cd
	ISO 1044:	AG 304
	Interval talila (Sol./Liq.) [°C]	595-630
	Temperatura lemljenja [°C]	610
Primjena	Gustoća [g/cm ³]	9,3
	Za spajanja lemljenjem, također u serijskoj proizvodnji, npr: ne i niskolegirani čelici, legirani čelici (alatni čelici), visokolegirani čelici (nehrđajući CrNi čelici), nikal, legure na bazi nikla, bakar i bakrene legure, kao i temper lijev. Tipični primjeri primjene jesu: dijelovi iz nehrđajućeg čelika i mesinga, bakra, kontrolna armatura kao manometri, klimatizacijski sustavi, izmjenjivači topline, cjevovodi, instalacije vode i centralnog grijanja, srebrni i sinter kontakti na bakrene materijale, pritezni spojevi na kablovima, listovi pila i tvrdi metali u strojogradnji, finomehaničke komponente u industriji satova, itd.	

Tablica 7: Tehnički podaci talila [25]

Naziv	Castolin 1802 Atmosin	
Osobine	Talilo koje uklanja okside i površinske nečistoće tokom postupka zagrijavanja kako bi se ostvario zadovoljavajući spoj. Također smanjuje površinsku napetost i poboljšava kapilarnost. Nakon lemljenja ostatak talila može se jednostavno ukloniti mehanički ili otopinom natrijevog hidroksida (kaustična soda)	
Tehnički podaci	DIN 8511:	F-SH 1
	ISO 1045:	FH10
	Aktivna temperatura[°C]	400-780
	Oblik	Prah
Primjena	Sredstvo za razrjeđivanje	Voda
	Lemljenje sa dodatnim materijalom na bazi srebra sa temperaturnim rasponom od 450 do 850 °C za spajanje bakra, bronce, ugljičnog i nehrđajućeg čelika.	

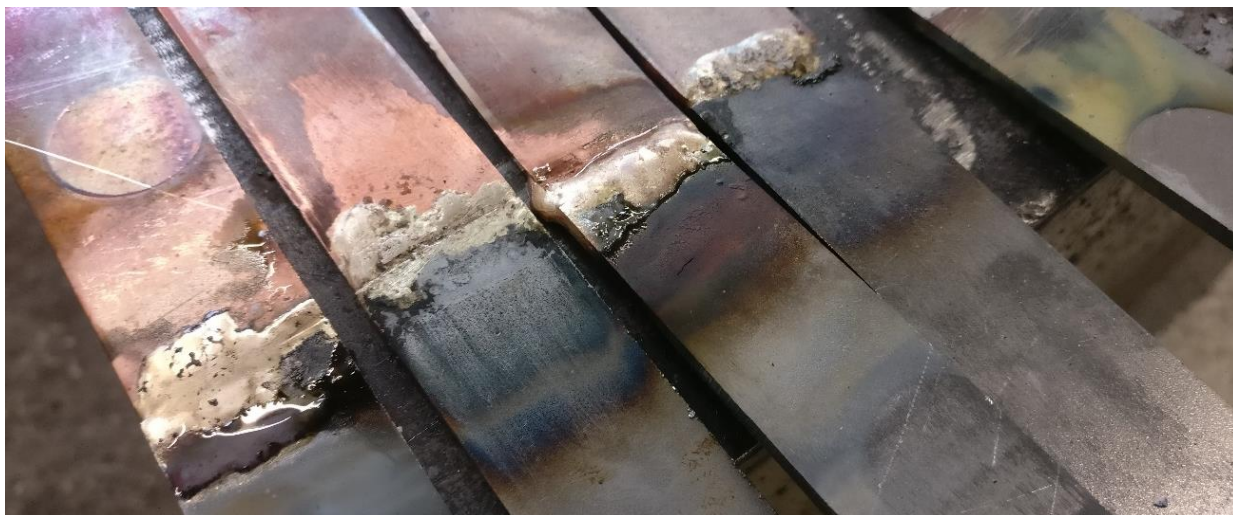
Slika 30 prikazuje sam postupak lemljenja. Valja napomenuti kako je na slici prikazano lemljenje sa podlogom od metala koja je kasnije zamijenjena šamotnom ciglom. Na slici se sa desne strane može uočiti posuda u kojoj je napravljena pasta od talila.



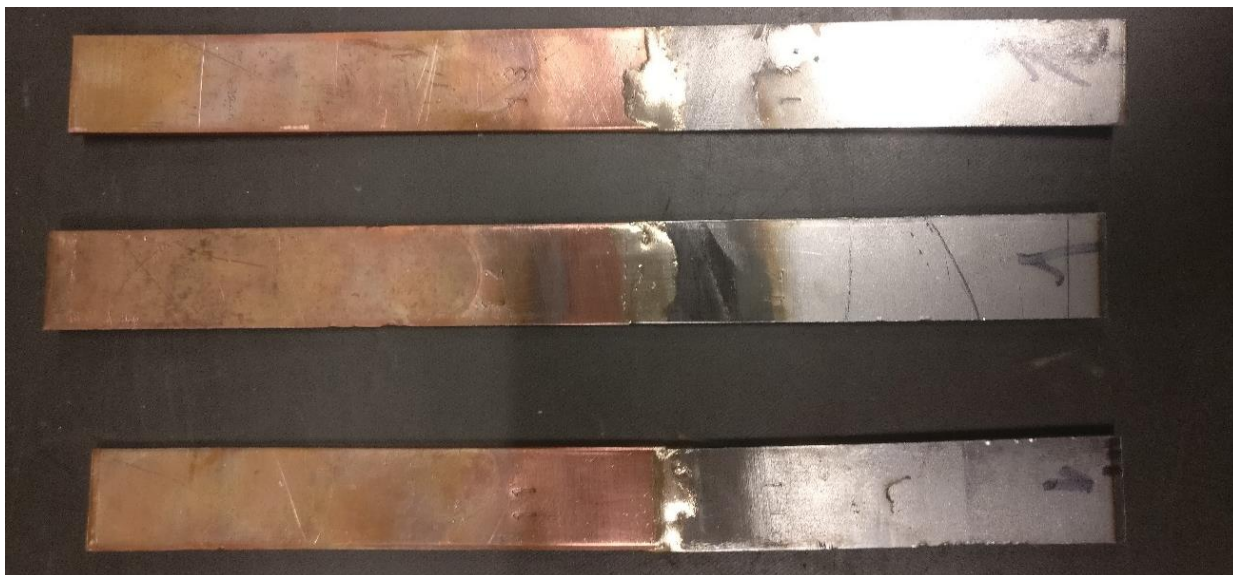
Slika 30: Postupak lemljenja uzoraka

14.3. Obrada uzoraka nakon lemljenja i vizualna kontrola

Zalemljene uzorke nakon lemljenja bilo je potrebno očistiti od ostatka talila i nečistoća te oksidacije koja je nastala prilikom lemljenja. Slika 31 prikazuje dio uzoraka direktno nakon lemljenja, dok slika 32 prikazuje dio uzoraka nakon čišćenja. Na slici 31 jasno se vide ostatci talila (staklasta površina) kao i razne nečistoće i oksidacija površine. Za čišćenje površine korištena je žičana četka i brusni papir, te je nakon mehaničkog čišćenja površina dodatno očišćena alkoholom.



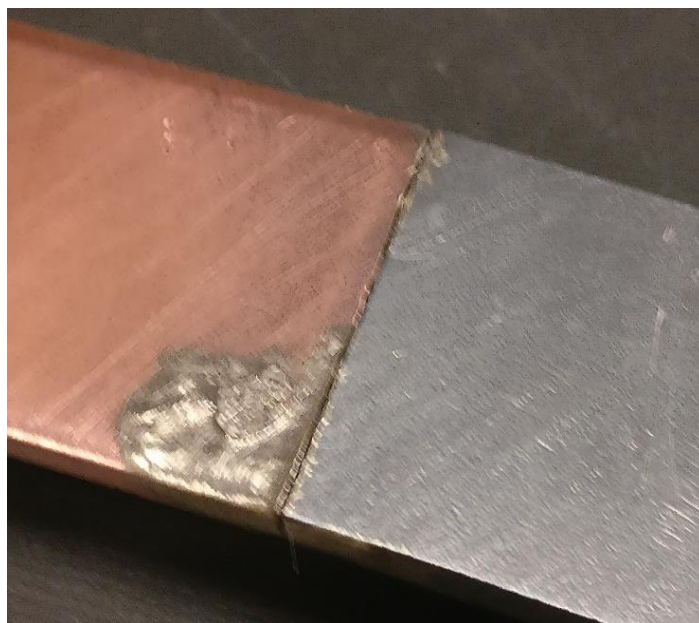
Slika 31: Izgled površine uzoraka nakon lemljenja



Slika 32: Izgled površine uzoraka nakon čišćenja

Nakon čišćenja površine spoja pristupilo se vizualnom pregledu istog. Vizualnim pregledom nastojalo se utvrditi postojanje pukotina i sama estetika spoja. Što se tiče pukotina na spoju svi uzorci su bez vizualno vidljivih pukotina izuzev uzorka 13 (prikazan na slici 33) koji ima pukotinu duž cijele površine spoja.

Što se tiče vizualnog izgleda spojeva on varira od uzorka do uzorka i taj dio uvelike ovisi o stručnosti i iskustvu osobe koja izvodi spoj. Primjer lošeg vizualnog izgleda prikazan je na slici 34 dok slika 36 prikazuje zadovoljavajući vizualni izgled spoja.



Slika 33: Pukotina duž spoja (uzorak 13)



Slika 34: Vizualno loš spoj (uzorak 22)



Slika 35: Vizualno dobar spoj (uzorak 11)

14.4. Ispitivanje radiografskom metodom

Poslije vizualne kontrole uzorci su ispitani radiografskom metodom kako bi se provjerilo postoje li nepravilnosti u spoju koje se ne mogu uočiti vizualnim pregledom. Prilikom ispitivanja i za obradu rezultata korištena je sljedeća oprema, od koje je rendgenska cijev prikazana na slici 36:

- Rendgen: BALTEAU GM 300D
- Skener: VMI 3600SF
- Slikovna ploča: Industrex XL blue 10" x 12"

Parametri snimanja:

- Napon: 125 kV
- Struja: 4 mA
- FF udaljenost: 1000 mm
- Vrijeme ekspozicije: 2,5 min

Parametri skeniranja:

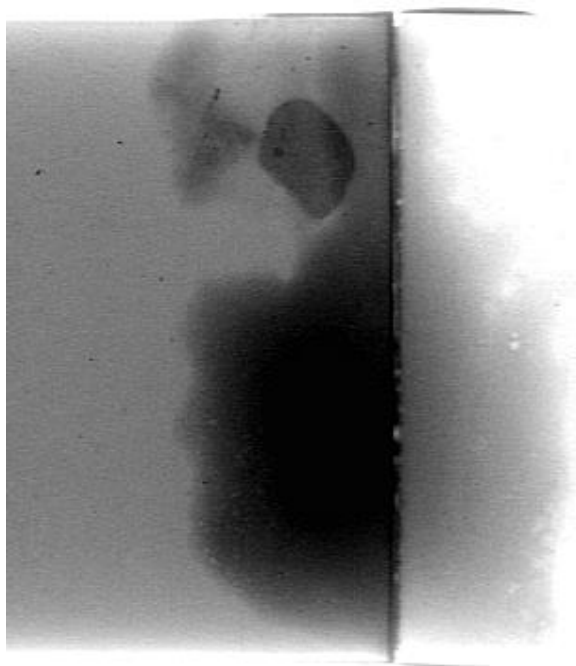
- Napon lasera - 15 V
- Napon fotomultiplikatora - 5.25 V
- Rezolucija skeniranja - 50 μm



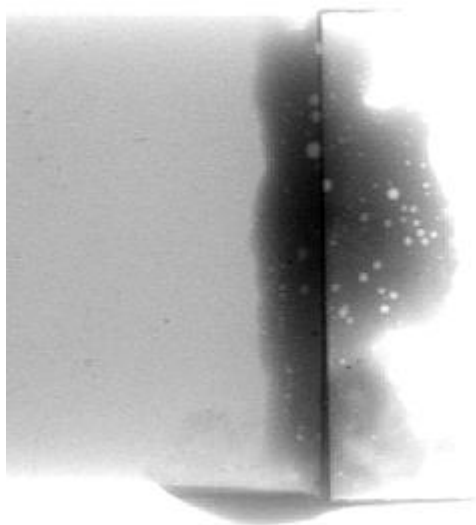
Slika 36: Rendgenska cijev

Nakon skeniranja slikovnih ploča dobiven je radiogram u digitalnom obliku kojeg je moguće pregledavati i analizirati uz pomoć ISee! Aplikacije koja je namijenjena za analiziranje radiograma.

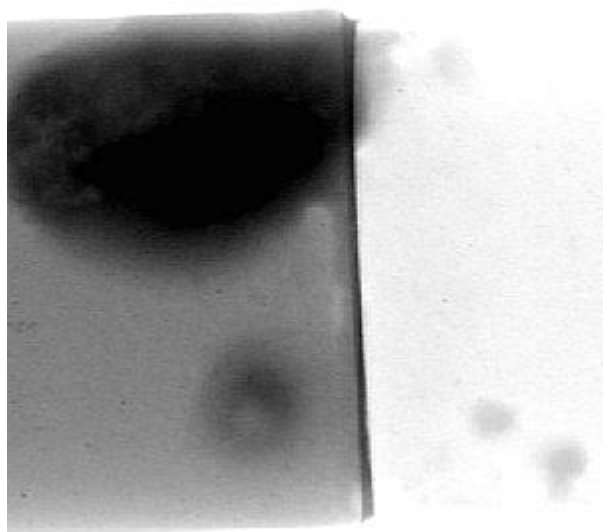
Iz analize radiograma vidljivo je kako je većina spojeva bez ikakvih indikacija unutar zone spoja dok se na uzorku 13 jasno može vidjeti pukotina kako je prikazano na slici 78. Na nekoliko uzoraka vidljive su indikacije unutar zone spoja, primjerice na uzorku 11 kao što je prikazano na slici 38 međutim problem je interpretirati navedene indikacije. Budući da se nalaze unutar zone spoja ali i izvan iste na području gdje je došlo do tečenja dodatnog materijala po površini osnovnog, može se zaključiti da je riječ o porama. Ovom metodom ispitivanja nije moguće detektirati dubinu na kojoj se one nalaze. Slika 39 prikazuje radiogram ispravno napravljenog zalemljenog spoja. Tamnija područja na radiogramu su mjesta gdje se dodatni materijal razlio po površini osnovnog materijala. Tamniji materijal na radiogramu je bakar dok je svjetliji materijal čelik. Razlike u prikazu na radiogramu proizlaze iz različitih otpora prodiranju zračenja kroz iste.



Slika 37: Radiogram pukotine uzduž spoja (uzorak 13)



Slika 38: Indikacije na radiogramu (uzorak 11)



Slika 39: Radiogram bez vidljivih indikacija (uzorak 31)

14.5. Mjerenje prekidne sile

Mjerenjem prekidne sile utvrdit će se čvrstoća spoja, a samim tim moći će se usporediti mehanička svojstva spoja u odnosu na zračnost. Ispitivanje se provelo na univerzalnoj kidalici proizvođača: WPM, verzija: 400kN, vrsta: EU 40mod. Brzina ispitivanja iznosila je $v_0=10$ mm/min. Slika 40 prikazuje kidalicu dok slika 41 prikazuje trenutak pucanja uzorka u čeljustima kidalice prilikom ispitivanja.



Slika 40: Kidalica EU 40mod



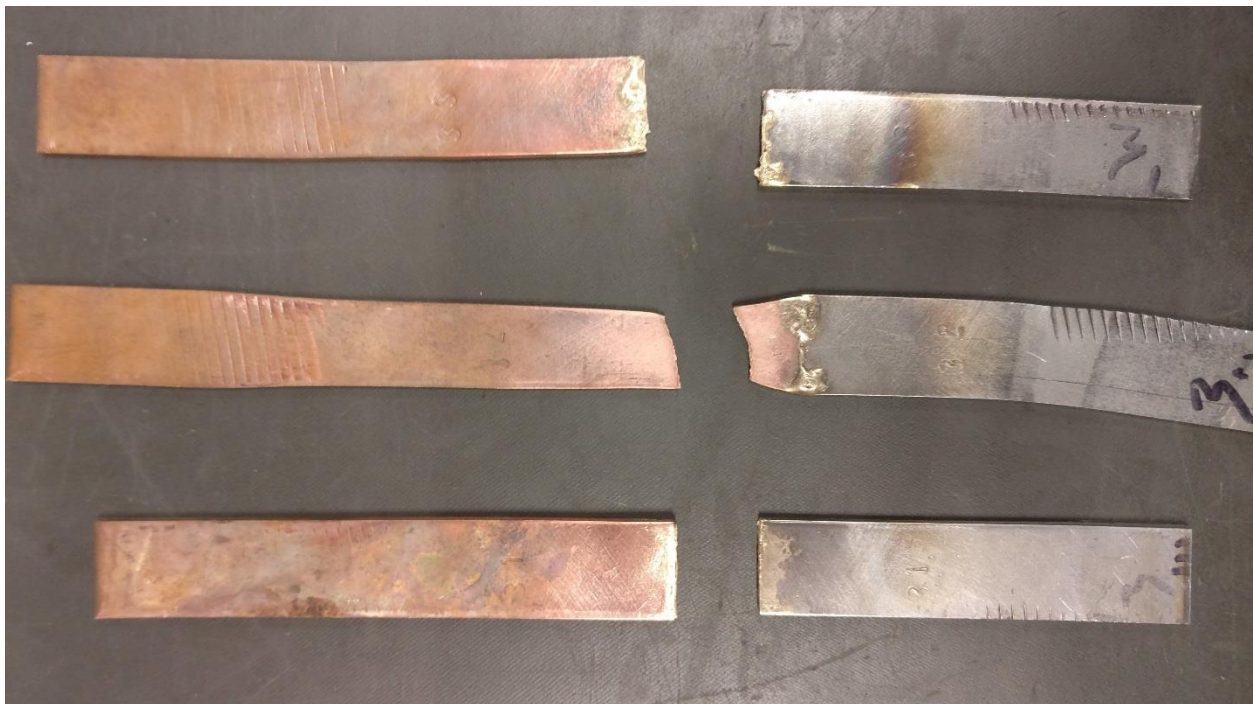
Slika 41: Uzorak u čeljustima kidalice (uzorak 42)

Nakon vlačnog ispitivanja mjesta na kojima je došlo do pucanja spoja pregledana su vizualno kako bi se utvrdio razlog i točno mjesto pojave pukotine. Također je pregledana i uniformnost spoja tj. postoje li u spoju pore, nečistoće i uključci, te kakvo je bilo tečenje dodatnog materijala. Na većini uzoraka pukotina se javila na spoju tj. pukotina se proširila kroz dodatni materijal. U slučaju uzoraka 12, 21, 32 i 43 pukotina se javila na osnovnom materijalu i to na bakrenoj pločici kako je prikazano na slici 42 gdje se jasno vidi lom u osnovnom materijalu. Podatci o najvećoj sili koja se javila prilikom vlačnog opterećenja kao i površine presjeka spoja dane su u tablici 8. dok je dijagram prikazan na slici 46.

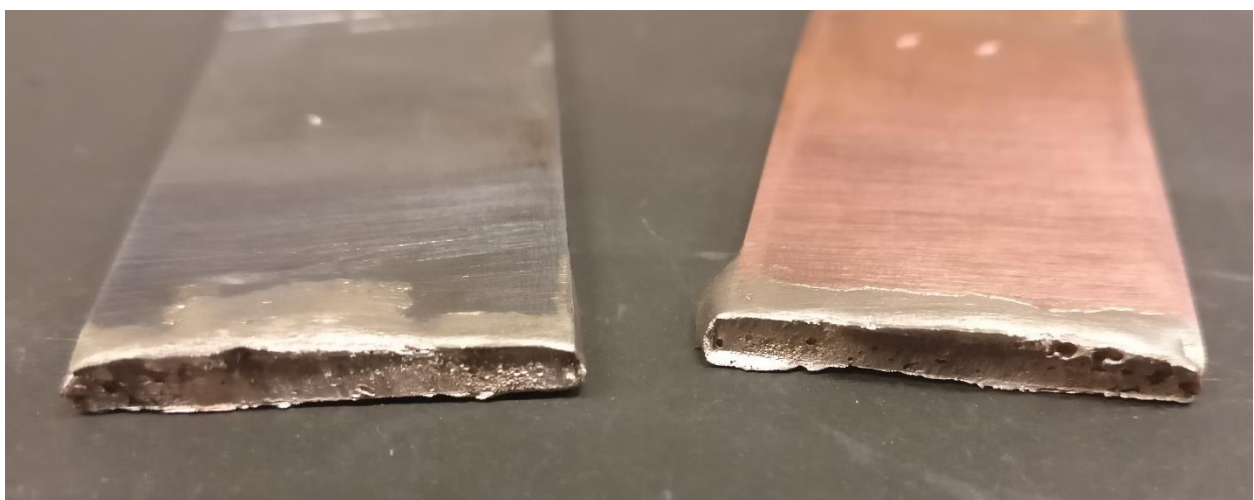
Tablica 8: Najveće sile pri kojima je došlo do razaranja spoja

Oznaka uzorka	11	12	13	21	22	23
Najveća sila [N]	9,140	16,868	2,692	16,293	15,105	12,260
Površina spoja [mm ²]	82,76	77,42	77,52	78,89	77,47	76,06
Oznaka uzorka	31	32	33	41	42	43
Najveća sila [N]	5,144	16,567	11,243	15,485	8,709	16,596
Površina spoja [mm ²]	76,82	77,60	77,45	76,93	78,64	77,65

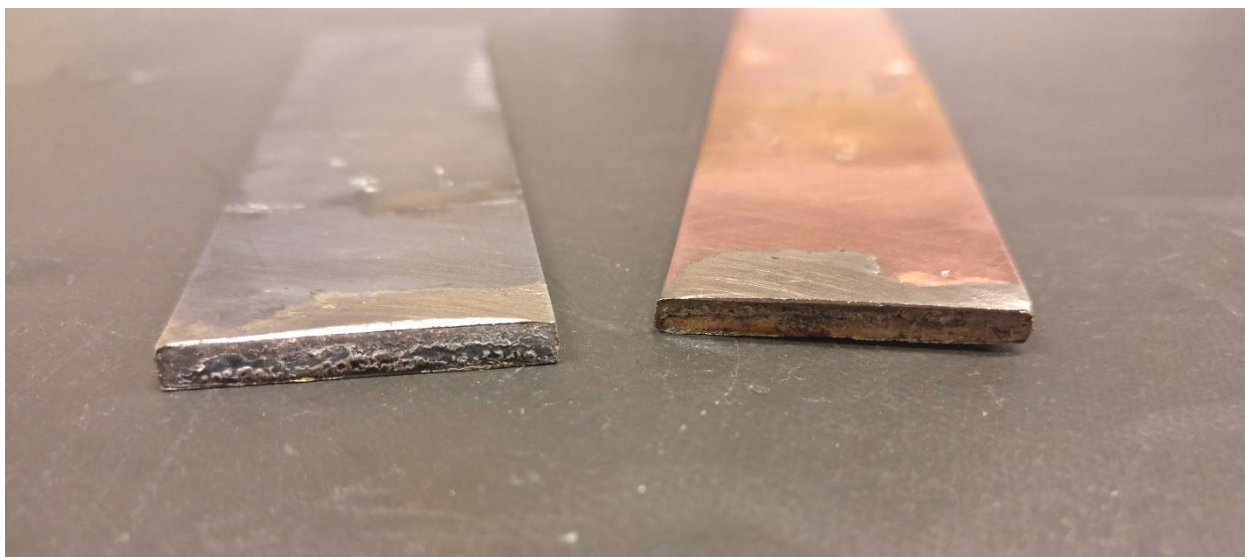
Što se tiče grešaka spoja, na spojevima koji su popustili na nižoj sili uočene su određene greške poput pora i uključaka na uzorcima 11 i 42, nedovoljnog tečenja dodatnog materijala u spoj i nalemljivanja na uzorcima 13, 31 i 33. Slika 43 prikazuje zonu spoja na uzorku 11 nakon ispitivanja. Moguće je uočiti dvije velike pore sa desne strane kao i mnoštvo sitnih pora sa lijeve strane spoja na bakrenoj pločici. Slika 44 prikazuje uzorak 13 kod kojega nije došlo do kvašenja površina spoja i tečenja dodatnog materijala u isti što je rezultiralo formiranjem spoja samo na površini materijala a ne u procjepu gdje se spoj i trebao inicijalno formirati. Slika 45 prikazuje zonu spoja kvalitetno ostvarenog zalemljenog spoja uzorka 43 gdje je vidljivo da je došlo do pucanja osnovnog materijala tj. bakra u zoni spoja.



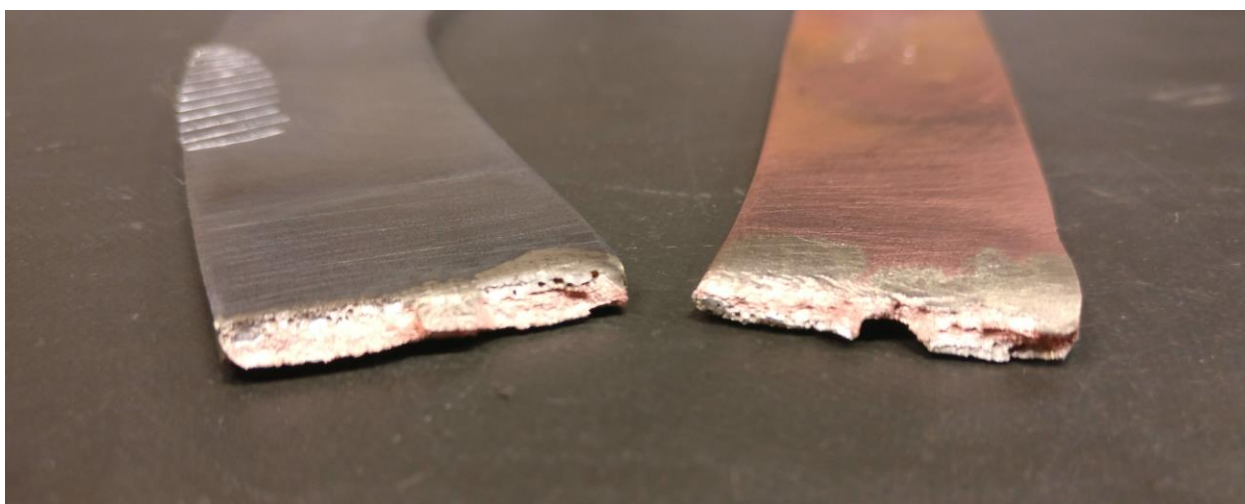
Slika 42: Uzorci iz skupine 3 nakon ispitivanja



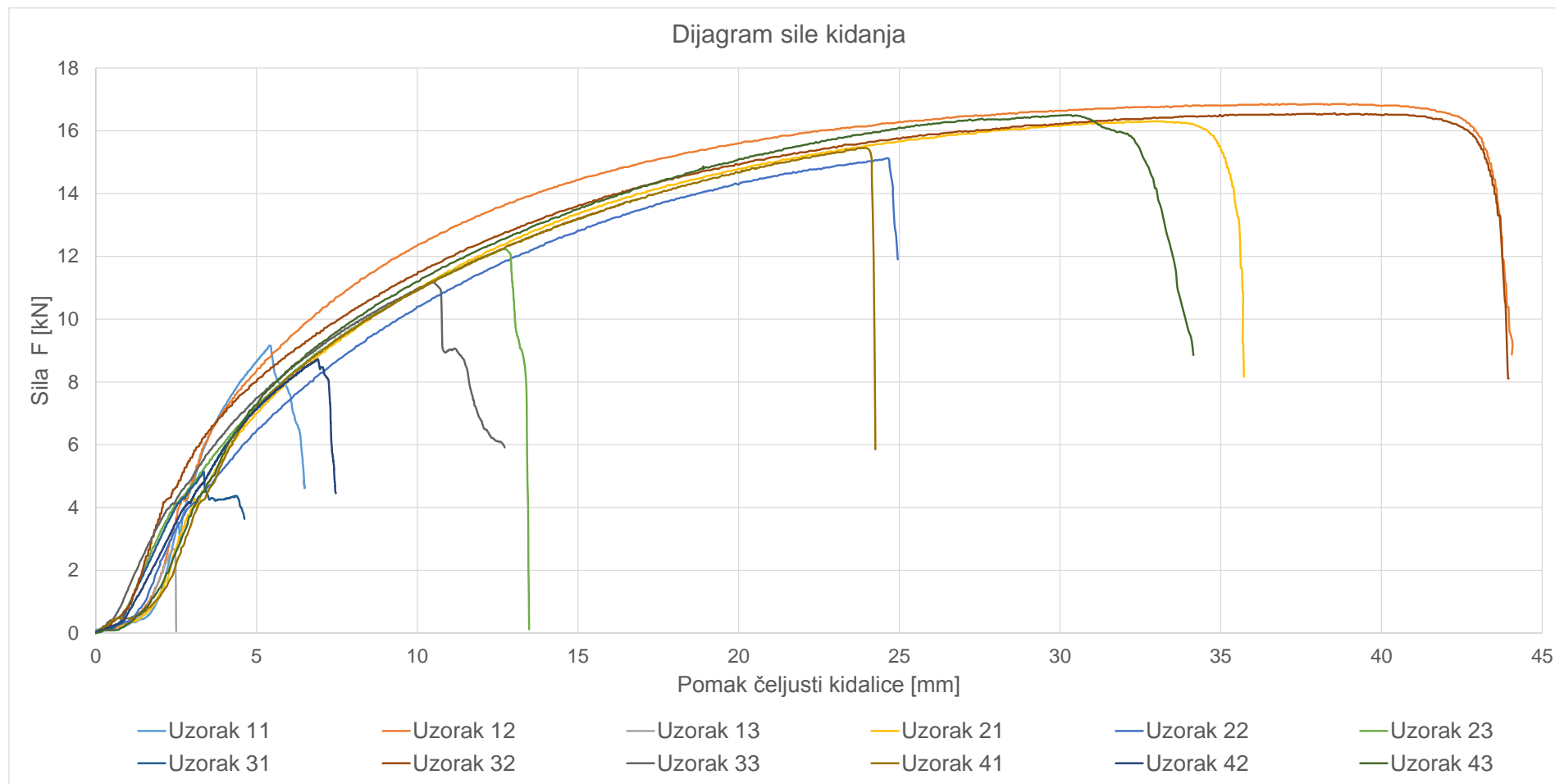
Slika 43: Pore unutar spoja (uzorak 11)



Slika 44: Nedovoljno kvašenje i penetracija dodatnog materijala (uzorak 13)



Slika 45: Prikaz puknutog kvalitetno zalemljenog spoja (uzorka 43)



Slika 46: Dijagram sila na ispitnim uzorcima

ZAKLJUČAK

Lemljenje kao postupak spajanja u strojarstvu relativno je zapostavljeno pored drugih postupaka spajanja poput zavarivanja, spajanja vijcima, lijepljenja itd. Sa stajališta primjene lemljenja u strojarstvu ono se često koristi kod spajanja kompleksnih oblika kada je brže i jednostavnije dijelove zalemiti u jednom prolazu nego spajati na primjer zavarivanjem ili nekom drugom metodom. Primjer toga različiti su izmjenjivači topline i cijevi kod kojih se dijelovi međusobno pozicioniraju i spajaju u jednoj operaciji dok bi se kod zavarivanja dijelovi morali spajati sa više operacija te bi pored duljeg vremena spajanja bili i više toplinski opterećeni. Uz današnji razvoj dodatnih materijala i talila moguće je zalemiti veliku većinu metala i njihovih legura uz izuzetak titana i berilija koji se ne mogu lemiti. Pravilno oblikovanje i proračun spojeva uz adekvatnu pripremu, imperativi su za osiguravanje kvalitete i nosivosti spojeva, koji pravilno izvedeni mogu konkurirati ostalim postupcima spajanja.

Rezultati ispitivanja utjecaja zazora prilikom pripreme spoja na mehanička svojstva spoja pokazali su kako prilikom ručnog lemljenja plamenikom gotovo da i nema utjecaja na mehanička svojstva spoja sve dok god talilo i dodatni materijal mogu prodrijeti u zonu spoja i formirati isti. Kao što se može uočiti iz tablice 8 i dijagrama na slici 46, ukoliko se površina materijala koji se spaja adekvatno pripremi, te se pazi na parametre poput smještanja talila, temperature zagrijavanja itd. slični spojevi imaju i slična mehanička svojstva bez obzira na zazor. U tablici i dijagramu također je vidljivo veliko rasipanje rezultata ispitivanja. Ono proizlazi iz činjenice kako je riječ bila o ručnoj metodi lemljenja gdje nije jednostavno definirati i održavati konstantnima parametre već oni uvelike ovise i o samom iskustvu i vještini osobe koja izvodi spoj kao i pripremi samoga spoja prije spajanja. Kod spojeva koji su imali niske prekidne sile nerazornom metodom, a kasnije i razaranjem spoja utvrđeno je da su imali greške unutar spoja u obliku pora, uključaka, nalemljivanja dok u slučaju uzorka 13 dodatni materijal nije uopće formirao spoj u zazoru već na površini uzoraka budući da je površina bakra bila neadekvatno pripremljena te talilo nije moglo odraditi svoju funkciju uslijed visoke količine oksida i nečistoća na površini koja se nalazi u zoni spoja. Iz tog razloga pukotina tj. neformirani spoj mogao se uočiti odmah nakon lemljenja. Iz ispitivanja se također može zaključiti kako je puno važnija kao što je ranije navedeno pravilna priprema površina koje se spajaju kao i vještina i iskustvo osobe koja izvodi spoj budući da će kvaliteta spoja prvenstveno ovisiti o njima.

Metoda radiografije kao jedna od nerazornih metoda za ispitivanje zalemljenih spojeva pokazala se prikladnom za ispitivanje i procjenu mehaničkih svojstava spojeva. Budući da je riječ o jednom obliku digitalne radiografije rezultati ispitivanja mogu biti relativno brzo gotovi te ih se može u bilo koje vrijeme pregledavati i oni se mogu arhivirati za kasnija pregledavanja. Kako je rezultat ispitivanja digitalni radiogram, on se može obrađivati i pregledavati uz pomoć specijaliziranih programa kako bi se lakše uočile indikacije za razliku od tehnike snimanja filmom. Jedini nedostatak ove metode je što nije poznata dubina na kojoj se nalaze indikacije, razlučivost je nešto niža u odnosu tehnologiju snimanja filmom te što je potrebno iskustvo prilikom interpretiranja radiograma za razliku od nekih drugih metoda ispitivanja poput metode ispitivanja penetrantima.

Spoj koji se koristio prilikom ispitivanja tj. sučeljeni spoj rijetko se primjenjuje u praksi iz razloga što je zbog male površine spoja osjetljiviji na greške koje mogu nastati prilikom lemljenja te mu mehanička svojstva uvelike mogu varirati ovisno o njima. Također valja napomenuti kako imaju puno manju nosivost u odnosu na preklopne spojeve iz razloga što imaju puno manju nosivu površinu spoja. Preklopni spoj ukoliko se pravilno proračuna i konstruira pored navedene nosivosti posjeduje i veću toleranciju na pogreške koje se mogu pronaći u spoju. Iz toga proizlazi kako mehanička svojstva uvelike ovise i o samome oblikovanju spoja.

LITERATURA

- [1] ASM International: ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing and Soldering, ASM International, 1993.
- [2] American Welding Society: Brazing handbook Fourth Edition, American Welding Society, 1991.
- [3] HRN EN ISO 4063:2012 Zavarivanje i srodni postupci -- Nomenklatura postupaka i referentni brojevi
- [4] <http://www.motori.hr/forum/index.php?topic=251438.375>, dostupno 8.7.2017.
- [5] <http://www.publicworksgroup.com/blog/2016/02/we-are-all-flint-michigan/>, dostupno 7.2017.
- [6] Garašić I.: Podloge za predavanja iz kolegija Zavarivanje i montaža, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [7] <http://www.mech-engg.tk/brazing-vs-welding-vs-soldering/>, dostupno 8.7.2017.
- [8] <http://www.fusion-inc.com/brazing/>, dostupno 8.7.2017.
- [9] <http://en.metaplast.eu/what-we-do/brazing--welding/34-brazing-.html>, dostupno 8.7.2017.
- [10] <http://www.loval.fi/vacuum-brazing.html>, dostupno 8.7.2017.
- [11] <http://www.dw-inductionheating.com/Technology/Brazing-copper-pivot-ssembly-222.html>, dostupno 8.7.2017.
- [12] <https://youtu.be/qjNHCxvB8Kc>, dostupno 8.7.2017.
- [13] <http://www.hitempbrazing.com/>, dostupno 8.7.2017.
- [14] http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Glossary/Glossary_C.html, dostupno 8.7.2017.
- [15] http://www.tsitec.com/copper_tubing_alloys.html, dostupno 8.7.2017.
- [16] <http://www.esmanelektronik.com/en/products/12-soldering/25-soldering-materials.html>, dostupno 8.7.2017.
- [17] HRN EN 1045:2001. Tvrdi lemljenje -- Talila za lemljenje -- Razredba i tehnički uvjeti isporuke
- [18] Fenton E. A.: Soldering Manual, American Welding Society, 1959.
- [19] https://www.fsb.unizg.hr/elemtroj/pdf/pmf/osnove_strojarstva/lemljeni_spojevi.pdf, dostupno 8.7.2017.
- [20] Markučić D.: Podloge za predavanja i vježbe iz kolegija Osiguravanje kvalitete zavarenih konstrukcija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

- [21] EN 12799:2009. Tvrdo lemljenje - Ispitivanje bez razaranja zalemljenih spojeva
- [22] <https://vacaero.com/information-resources/vacuum-brazing-with-dan-kay/1357-x-ray-inspection-of-brazed-joints.html>, dostupno 8.7.2017.
- [23] <https://www.heliumleaktesting.com/helium-leak-testing/>, dostupno 8.7.2017.
- [24] <http://www.ami-lovrekovic.hr/pdf/lemovi/lemovi.pdf>, dostupno 8.7.2017.
- [25] <http://www.ceweld.nl/en/node/1948>, dostupno 8.7.2017.